

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dugorepec Andrija

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Željko Alar

Student:

Andrija Dugorepec

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru doc. dr. sc. Željku Alaru na savjetima i pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Andrija Dugorepec**

Mat. br.: 0035175608

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Primjena referentnih materijala za određivanje točnosti pokazivanja
instrumentiranog Charpy-evog bata**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

The use of reference materials to determine indication accuracy of
Instrumented Charpy pendulum

Opis zadatka:

Instrumentirana metoda određivanja udarnog rada loma Charpy-evim batom je nova metoda za utvrđivanje udarnog rada loma metalnih materijala. Osnovni problem kod provjere ovih uređaja je određivanje točnosti pokazivanja uređaja za što se koriste referentne epruvete. Primjenom referentnih materijala za izradu ovih epruveta može se postići točnije pokazivanje uređaja.

U radu je potrebno:

1. Opisati metode određivanja udarnog rada loma.
2. Opisati instrumentiranu metodu određivanja udarnog rada loma Charpy-evim batom.
3. Primjena referentnih materijala za izradu referentnih epruveta.
4. Eksperimentalno provesti provjeru Charpy-evog bata.
5. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

Zadatak zadan:

12. ožujka 2015.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Željko Alar

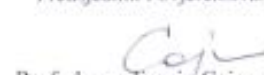
Rok predaje rada:

14. svibnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

20., 21. i 22. svibnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. UDARNI RAD LOMA	3
2.1 Prijelazna temperatura.....	3
2.2 Metode ispitivanja udarnog rada loma	7
2.2.1 Ispitivanje udarnog rada loma po Charpy-u	7
2.2.1.1 Oblik i dimenzije ispitnog uzorka	11
2.2.1.2 Mjerna oprema	14
2.2.1.3 Postupak ispitivanja.....	14
2.2.1.4 Ispitna temperatura.....	15
2.2.1.5 Prenosjenje ispitnog uzorka.....	15
2.2.1.6 Zaglavljenje ispitnog uzorka	17
2.2.1.7 Lateralno (bočno) širenje	17
2.2.1.8 Pojava pukotine	19
2.2.1.9 Apsorbirana energija u ovisnosti o prijelaznoj temperaturi	21
2.2.2 Ispitivanje udarnog rada loma po Izodu	22
2.2.3 Pellini metoda (test padajućeg utega).....	24
2.2.4 Ispitivanje udarne radnje loma instrumentiranom Charpy metodom.....	27
2.2.4.1 Ispitni uređaj	30
2.2.4.2 Mjerenje sile	31
2.2.4.3 Umjeravanje	33
2.2.4.4 Mjerenje pomaka	34
2.2.4.5 Aparatura za snimanje	34
2.2.4.6 Prikaz rezultata	35
3. PRIMJENA REFERENTNIH MATERIJALA PRI PROVJERI CHARPY-evog BATA 39	
3.1 Zahtjevi za referentne materijale	39
3.2 Indirektna provjera Charpy-evog bata upotrebom referentnih uzoraka	41
4. EKSPERIMENTALNI DIO	42
4.1 Provjera instrumentiranog Charpy-evog bata	42
4.2 Ispitivanje udarnog rada loma instrumentiranom metodom	51
4.3 Statičko vlačno ispitivanje	57

5. ANALIZA REZULTATA	63
5.1 Analiza rezultata umjeravanja	63
5.2 Analiza ispitivanja uzoraka instrumentiranom Charpy-evom metodom.....	65
5.3 Analiza statičkog vlačnog ispitivanja.....	70
5.4 Analiza usporedbe sila.....	70
6. ZAKLJUČAK.....	72
LITERATURA.....	74
PRILOZI.....	76

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz raznih vrsta lomova: (a) Krhki lom (b) Žilavi lom (c) Potpuno žilavi lom	1
Slika 2. Tipični dijagram naprezanja za žilavi i krhki materijal.	1
Slika 3. Utjecaj temperature ispitivanja na udarnu radnju loma	4
Slika 4. Varijacije u apsorbiranoj energiji.....	4
Slika 5. Površine loma u prijelaznoj zoni: a) krhki lom; b) i c) miješani lom; d) žilavi lom.....	5
Slika 6. Područje loma te bočne ekspanzije	6
Slika 7. Ispitivanje udarnog rada loma na Charpy-evom batu	8
Slika 8. Charpy-ev bat	9
Slika 9. Uređaj za ispitivanje Charpy metodom, Tinius Olsen	10
Slika 10. Uređaj za ispitivanje Charpy metodom, Atico.....	10
Slika 11. Ispitni uzorak.....	11
Slika 12. Oslonci ispitnog uzorka	14
Slika 13. Hvataljke ispitnog uzorka	16
Slika 14. Dvije prelomljene polovice Charpy-evog V-uzorka	18
Slika 15. Mjerni sat za mjerenje bočnog širenja	18
Slika 16. Određivanje udjela žilavog loma	19
Slika 17. Prikaz prijelomnih površina te postoci.....	20
Slika 18. Vodič za utvrđivanje vrste prijelomnih površina.....	21
Slika 19. Shematski prikaz krivulje apsorbirane energije i temperature.....	21
Slika 20. Prikaz ispitivanja po Izodu.....	23
Slika 21. Ispitni uzorak kod Izod metode.....	23
Slika 22. Uređaj za ispitivanje Izod metodom	24
Slika 23. Uzorak kod testa padajućim utegom	25
Slika 24. Pellini ispitni uređaj	26
Slika 25. Ispitni uzorci Pellini metode	26
Slika 26. Instrumentirani Charpy-ev bat	27
Slika 27. Instrumentirani nož	28
Slika 28. Zapis osciloskopa.....	29
Slika 29. Shematski prikaz zapisa	29
Slika 30. Konstrukcija instrumentiranog noža te pridružene krivulje.....	32
Slika 31. Dopustiva pogreška snimljene vrijednosti unutar nazivnog raspona sile	33
Slika 32. Prikaz karakterističnih krivulja dobivenih instrumentiranom.....	36
Slika 33. Prikaz krivulje sa karakterističnim silama	37
Slika 34. Certifikat sa referentnim uzorcima	40
Slika 35. Instrumentirani Charpy-ev bat, ZWICK/ROELL, RPK 450	43
Slika 36. Dijelovi Charpy-evog bata	44
Slika 37. Geometrija noža bata	45
Slika 38. Certifikat sa referentnim uzorcima (70 J)	46
Slika 39. Certifikat sa referentnim uzorcima (120 J)	47
Slika 40. Instrumentirani nož	48
Slika 41. Hvataljke	49
Slika 42. Centriranje uzorka.....	49
Slika 43. Prikaz slomljenih uzoraka.....	52
Slika 44. Dijagram uzorka 3.....	55
Slika 45. Dijagram uzorka 10.....	55

Slika 46. Uzorci krivulje E	56
Slika 47. Uzorci krivulje F	56
Slika 48. Kidalica HECKERT	57
Slika 49. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje	58
Slika 50. Epruveta sa danim kotama	58
Slika 51. Učvršćivanje epruvete	59
Slika 52. Prikaz ekstenziometra	60
Slika 53. Dijagram $F-AL$ za uzorak 1	60
Slika 54. Lom epruvete	61
Slika 55. Prikaz lomova svih epruveta	61
Slika 56. Dijagram udarnog rada loma referentnih uzoraka (70 J)	63
Slika 57. Dijagram udarnog rada loma referentnih uzoraka (120 J)	64
Slika 58. Dijagramski prikaz vrijednosti visine i širine ispitnih uzoraka	65
Slika 59. Dijagramski prikaz vrijednosti dužine ispitnih uzoraka	66
Slika 60. Dijagramski prikaz vrijednosti kuteva ispitnih uzoraka	67
Slika 61. Dijagram udarnog rada loma	68
Slika 62. Vrijednosti sila dobivenih instrumentiranom metodom	69
Slika 63. Usporedba rezultata sila	70

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije i tolerancije ispitnog uzorka (V-zarez)	12
Tablica 2. Dimenzije i tolerancije ispitnog uzorka (U-zarez)	13
Tablica 3. Dimenzije hvataljki	16
Tablica 4. Postotak žilavog loma	20
Tablica 5. Dozvoljeni rasponi apsorbirane energije	39
Tablica 6. Vrijednosti standardne devijacije	40
Tablica 7. Prikaz rezultata (70 J).....	50
Tablica 8. Dimenzije uzoraka.....	51
Tablica 9. Rezultati udarnog rada loma	53
Tablica 10. Rezultati ispitivanja sila i pomaka instrumentiranom metodom	54
Tablica 11. Mjere epruveta.....	59
Tablica 12. Rezultati ispitivanja.....	62
Tablica 13. Srednje vrijednosti sila	69
Tablica 14. Srednje vrijednosti rezultata statičkog vlačnog ispitivanja	70

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
T_p	°C	prijelazna temperatura
σ	MPa	naprezanje
ε	mm/mm	deformacija, istezanje
m	kg	masa bata
g	m/s ²	ubrzanje zemljine sile teže
h_1	m	početna visina bata
h_2	m	kranja visina bata
E_f	J	suma energije plastične deformacije
NDT	°C	temperatura nulte duktilnosti
E_T	J	ukupna utrošena energija
E_i	J	energija utrošena u nastajanje pukotine
E_p	J	energija utrošena u širenje pukotine
E'	J	ukupna energija loma
v_0	m/s	početna brzina njihala
P	N	trenutno opterećenje
t	s	vrijeme
G	N	težina bata
R_a	μm	površinska hrapavost
l	mm	dužina uzorka
h	mm	visina uzorka
w	mm	širina uzorka
KV	J	udarni rad loma
F	N	sila
w_t	J	ukupna energija bata
s	mm	pomak savijanja
F_{gy}	N	glavna sila
F_m	N	maksimalna sila
F_{iu}	N	sila početka pucanja
$F_a (F_b)$	N	sila prestanka pucanja

Oznaka	Jedinica	Opis
s_t	mm	ukupni pomak
W_m	J	energija pri maksimalnoj sili
W_{iu}	J	energija nastajanja pukotine
W_a	J	energija prestanka pucanja
KV_R	J	certificirana vrijednost energije referentne epruvete
d_0	mm	početni promjer vrata epruvete
L_0	mm	dužina epruvete
S_0	mm ²	početni presjek
ΔL	mm	produljenje epruvete
L_u	mm	konačna dužina nakon loma epruvete
d_u	mm	konačni promjer nakon loma epruvete
R_m	MPa	vlačna čvrstoća
R_k	MPa	konačno naprezanje
R_{eH}	MPa	gornja granica razvlačenja
S_u	mm ²	površina poprečnog presjeka nakon produljenja
A	%	istezljivost
Z	%	suženje materijala

SAŽETAK

U teorijskom dijelu diplomskog rada opisano je značenje udarnog rada loma te su dane metode ispitivanja udarnog rada loma. Detaljno su opisana ispitivanja udarnog rada loma po Charpy-u te nova instrumentirana metoda ispitivanja po Charpy-u. Ispitivanje Charpy-evim batom je standardizirana metoda kojom se određuje količina apsorbirane energije u materijalu prilikom loma. Ta apsorbirana energija je mjera žilavosti materijala te služi kao alat za praćenje temperature prijelaza između krhkog i žilavog loma. U ovom dijelu rada dan je opis postupka ispitivanja udarnog rada loma instrumentirane i klasične metode Charpy-evim batom. Posebno su naglašene još neke mogućnosti ovih metoda.

U eksperimentalnom dijelu opisan je plan ispitivanja koji se sastoji od tri skupine ispitivanja. Provedba ispitivanja udarnog rada loma je bila predviđena na Charpy-evom batu proizvođača ZWICK. Stoga je provedena indirektna i direktna provjera ovog Charpy-evog bata. Indirektna provjera bata je provedena s certificiranim referentnim epruvetama nazivne vrijednosti 70 J i 120 J. U drugom dijelu eksperimentalnih istraživanja provedena su ispitivanja udarnog rada loma na ispitnim uzorcima izrađenih od čelika S275J0G3. U zadnjem dijelu su provedena ispitivanja mehaničkih svojstava istog čelika statičkim vlačnim ispitivanjem. Na temelju provedenih eksperimentalnih ispitivanja provedena je analiza te doneseni zaključci.

Ključne riječi: udarni rad loma, Charpy metoda, instrumentirana Charpy metoda, referentni materijali

SUMMARY

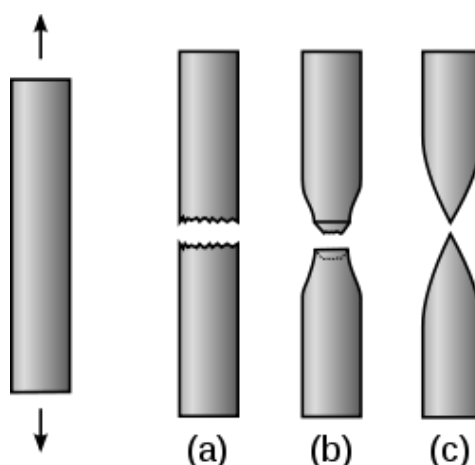
Theoretical part of this thesis describes the meaning of impact testing and methods for impact testing are given. Charpy pendulum test and new instrumented Charpy pendulum test are described in detail. Charpy pendulum test is a standardized method that determines the amount of energy absorbed in the material during fracture. This absorbed energy is the measure for toughness of a given material and acts as a tool to monitor ductile-brittle transition temperature. In this part of the paper, fracture toughness testing methods for Charpy pendulum test and instrumented Charpy pendulum test are given. Special emphasis is placed on some other possibilities of these methods.

In the experimental part of this thesis a testing plan for three groups of various experiments is described. Fracture toughness experiments were conducted on Charpy pendulum manufacturer ZWICK. Indirect and direct verification of the Charpy pendulum was preformed. Indirect verification was carried out with reference specimens that have the nominal value of 70 J and 120 J. The second part of experimental research was carried out on specimens made of steel S275J0G3. In the last part, testing of mechanical properties for S275J0G3 steel with static tensile testing was performed. Based on the results of the tests analysis was conducted and the conclusions are given.

Key words: fracture toughness testing, Charpy pendulum test, instrumented Charpy pendulum test, reference materials

1. UVOD

Za većinu mehanički opterećenih konstrukcija vrlo je važno osigurati kombinaciju dovoljne čvrstoće i žilavosti. Naime, praksa pokazuje da velik broj lomova nije rezultat prethodne plastične deformacije, nego posljedica nominalnog naprezanja nižeg od granice razvlačenja. Dakle, pojam žilavost je usko povezan s pojmom loma. Tako su poznati krhki i žilavi lom, odnosno govori se o krhkim i žilavim materijalima [1]. Prikaz vrsta lomova dan je na slici 1.



Slika 1. Prikaz raznih vrsta lomova: (a) Krhki lom (b) Žilavi lom (c) Potpuno žilavi lom [2]

Žilavost materijala je svojstvo koje govori o sposobnosti apsorpiranja mehaničke energije, uzrokovane vanjskim, uglavnom udarnim opterećenjem, putem plastične deformacije materijala. Količina energije koja se utroši za plastičnu deformaciju i lom predstavlja mjeru žilavosti materijala [1].



Slika 2. Tipični dijagram naprezanja za žilavi i krhki materijal [2].

Posebno je opasna vrsta krhkog loma karakteriziranog brzim i nekontroliranim širenjem pukotine, bez prethodne plastične deformacije.

Na pojavu krhkog loma utječu sljedeći faktori [1]:

- konstrukcijsko oblikovanje: urezi, provrti, nagle promjene presjeka, debelostijene konstrukcije i dr.,
- proizvodni postupci preko nastajanja površinskih i unutrašnjih pogrešaka i zaostalih naprezanja (urezi, ogrebotine, tragovi brušenja, plinski mjehurići, lunke i dr.),
- uvjeti naprezanja: udarno opterećenje, višeosno stanje naprezanja (npr. kao posljedica zavarivanja ili postupka deformiranja),
- okolni uvjeti: snižena temperatura, korozijska oštećenja površine, napetosna korozija, djelovanje vodika, djelovanje tekućih metala, zračenje neutrona i dr.,
- sastav i mikrostruktura materijala: krhkom lomu su skloniji metali s BCC i HCP rešetkom, lijevačkom mikrostrukturom, grubozrnatom i anizotropnom strukturom, presjeci s površinskim slojevima, nesmireni čelici, prisutnost nečistoća i nemetalnih uključaka, starenje, izlučivanje spojeva po granicama zrna pogoduju pojavi krhkog loma.

Definiranje potrebne razine žilavosti nije lak zadatak pri razvoju konstrukcije i izboru materijala, jer to svojstvo nema jednoznačno fizikalno objašnjenje i brojčano usporedbeno iskazivanje kao npr. čvrstoća, modul elastičnosti i slična svojstva. Čvrste veze i korelacije između žilavosti i ostalih mehaničkih svojstava ne postoje, ali u većini slučajeva materijali više čvrstoće i tvrdoće imaju nižu žilavost i obrnuto. U pravilu žilavost je niža pri nižim temperaturama, većim brzinama deformacije i pri višim vrijednostima elastičnih konstanti materijala [1].

Većina mjernih karakteristika žilavosti ne može se rabiti za proračune nosivosti i sigurnosti već su samo usporedbene veličine. Mehanika loma koja se bavi nastankom i širenjem pukotine posljednjih je desetljeća znatno pridonijela kvantitativnom opisivanju procesa širenja pukotine te računskoj provjeri sigurnosti konstrukcija koje sadrže pogreške u obliku ureza, šupljina ili pukotina [1]. Neke od metoda ispitivanja žilavosti biti će opisane u sljedećim poglavljima.

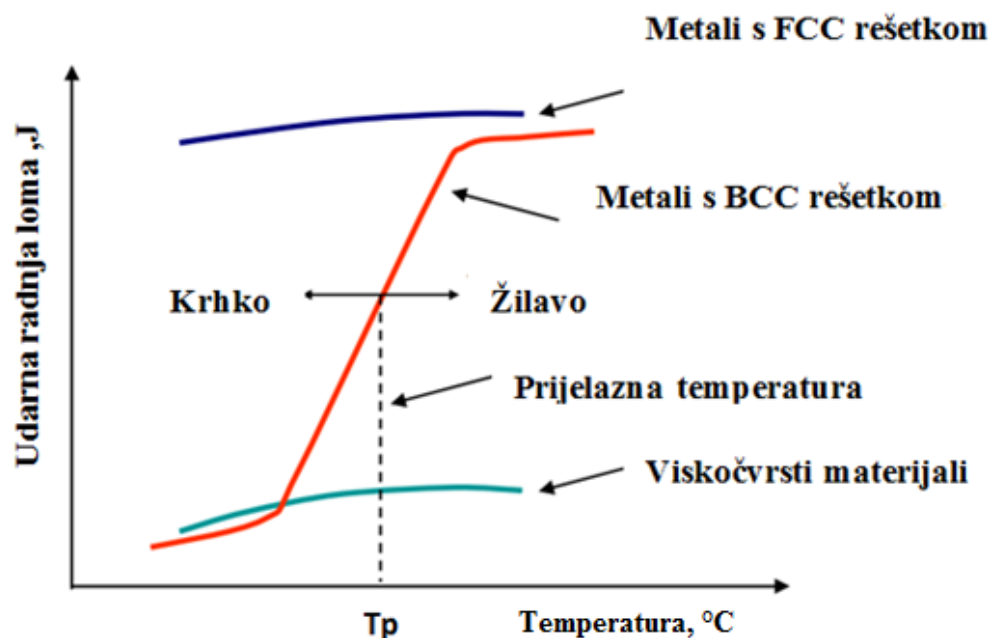
2. UDARNI RAD LOMA

Ispitivanjem udarnog rada loma utvrđuje se ponašanje metalnih i polimernih materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Udarni rad loma govori o energiji utrošenoj za lom epruvete određenog oblika i dimenzija [1]. Koncentracije naprezanja, kao što su pukotine i zarezi, mjesta su gdje započinje zamor materijala koji završava pucanjem. Poznato je da su pucanja materijala u prisutnosti zareza kontrolirana lomnom čvrstoćom materijala. Stoga se ispitivanja provode na epruvetama s utorima te se na taj način postiže višeosno stanje naprezanja u korijenu utora. Razvijene su i standardizirane mnoge metode kako bi se mjerila „čvrstoća zareza“ materijala. Skoro sve su kvalitativne i usporedive u prirodi. Ispitivanje se obično provodi pri normalnoj temperaturi ili pri sniženim temperaturama. Troosno stanje naprezanja, visoka stopa naprezanja te niske temperature doprinose krhkom lomu materijala. Stoga, kako bi se simulirali najteži uvjeti opterećenja, skoro svi testovi uključuju zarezan uzorak, koji biva lomljen pri raznim temperaturama. Vrijednost udarne radnje loma pokazuje hoće li se materijal ponašati žilavo ili krhko u uvjetima udarnog opterećenja. Udarni rad loma je potpuno usporedbena veličina i ne može služiti za proračun dijelova konstrukcija [4].

2.1 Prijelazna temperatura

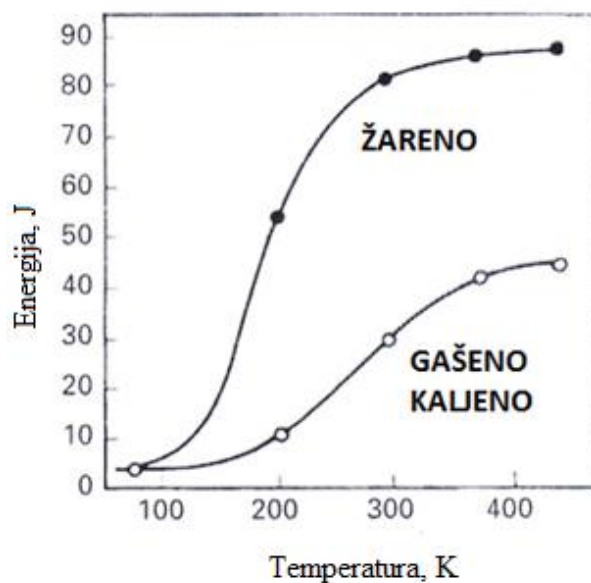
Temperatura kod koje nastupa promjena iz visoke energije loma prema niskoj energiji loma zove se žilavo-krhka prijelazna temperatura (T_p). Međutim, u praksi ne nastupa oštra promjena energije, stoga je vrlo teško odrediti tu prijelaznu temperaturu [4]. Prijelazna temperatura je u uskoj vezi s udarnim radom loma. Kako udarni rad loma za većinu metalnih materijala s BCC rešetkom ovisi o temperaturi, to T_p označava visinu temperature na prijelazu od visokih prema niskim vrijednostima udarnog rada loma [1]. Ispitivanje udarnog rada loma pri samo jednoj temperaturi nije značajno, zbog toga što energija apsorbirana pri lomu pada sa povišenjem temperature ispitivanja [4].

Slika 3 prikazuje utjecaj temperature ispitivanja na udarnu radnju loma za različite materijale te prijelaznu temperaturu.



Slika 3. Utjecaj temperature ispitivanja na udarnu radnju loma [5]

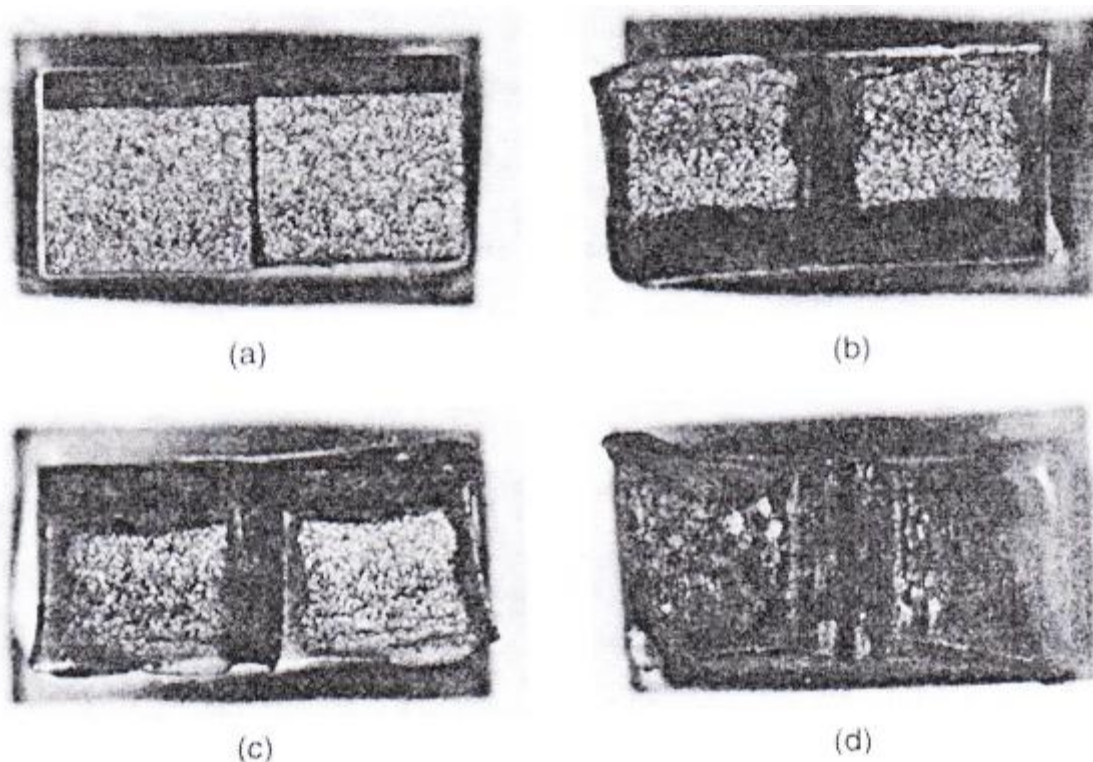
Slika 4 prikazuje varijacije u apsorbiranoj energiji kao funkciju temperature za čelik u žarenom, gašenom i kaljenom stanju.



Slika 4. Varijacije u apsorbiranoj energiji [4]

Što je veći dio žilavih prijeloma, veća je i energija apsorbirana u uzorku. Kod krhkog loma nastaje tipičan rascijep, te ne treba mnogo energije kao kod žilavog prijeloma.

Slika 5 prikazuje morfologiju promjene površine loma u prijelaznoj zoni [4].



Slika 5. Površine loma u prijelaznoj zoni: a) krhki lom; b) i c) miješani lom; d) žilavi lom [4]

BCC i HCP metali ili legure pokazuju žilavo-krhki prijelaz, dok FCC struktura ne. Stoga se provode serije ispitivanja na raznim temperaturama koja nam omogućuju određivanje prijelazne temperature. Ta temperatura je važan parametar u odabiru materijala, glede čvrstoće ili pojave krhkog loma. Kako se prijelazna temperatura ne može dovoljno precizno definirati, postoje brojni empirijski načini kako je definirati, bazirani na određenoj apsorbiranoj energiji, promjenama u aspektima loma, bočnim kontrakcijama koje nastaju u korijenu zareza ili bočnih ekspanzija uzoraka. Prijelazna temperatura ovisi o kemijskoj strukturi, toplinskoj obradi, obradi odvajanjem čestica, te mikrostrukturi materijala [4].

Među ovim varijablama, usitnjavanje zrna je jedina metoda koja rezultira povećanjem čvrstoće materijala, te smanjenjem prijelazne temperature [4].

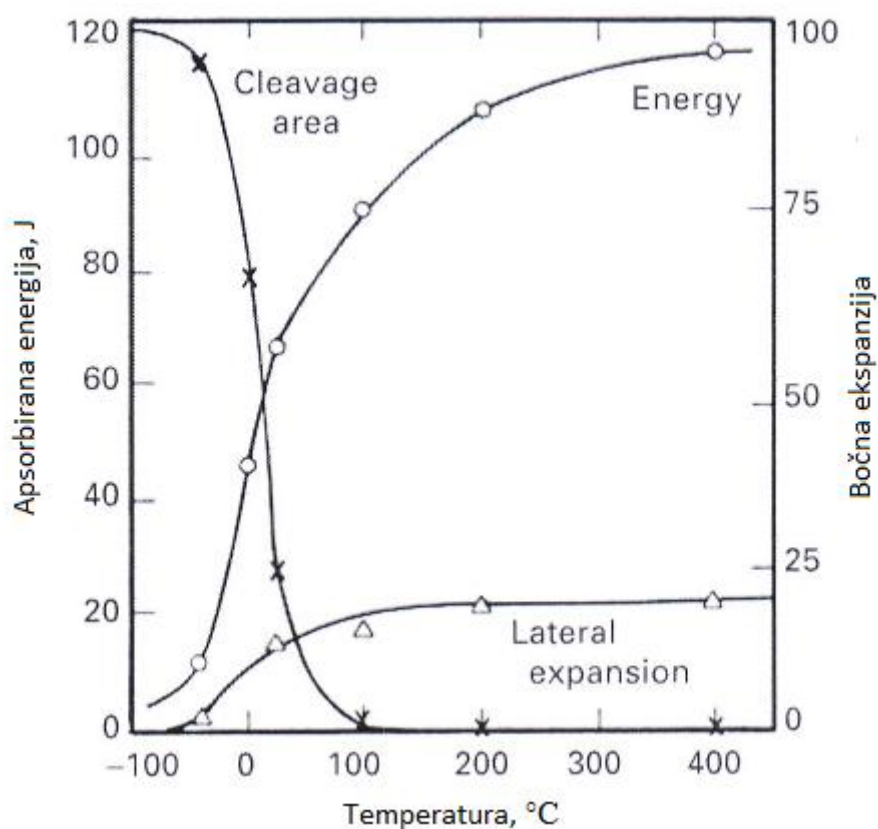
Hespol i Patch su prikazali kako prijelazna temperatura T_c ovisi o veličini zrna D prema formuli:

$$\frac{dT_c}{d \ln D^{\frac{1}{2}}} = -\frac{1}{\beta}$$

Graf prijelazne temperature u ovisnosti od $\ln D^{\frac{1}{2}}$ će biti ravni pravac sa nagibom $-\frac{1}{\beta}$.

Na slici 6 prikazani su djelići područja loma gdje se nalazi rascjep, te bočne ekspanzije u odnosu na apsorbiranu energiju bata [4].

Postoji izvrsna korelacija između ove tri krivulje, a test simulira dinamički odziv metala.



Slika 6. Područje loma te bočne ekspanzije [4]

2.2 Metode ispitivanja udarnog rada loma

Najčešće metode ispitivanja udarnog rada loma su:

- 1) ispitivanje udarnog rada loma po Charpy-u,
- 2) ispitivanje udarnog rada loma po Izodu,
- 3) temperatura nulte duktilnosti po Pelliniju,
- 4) ispitivanje udarnog rada loma instrumentiranom Charpy metodom.

2.2.1 Ispitivanje udarnog rada loma po Charpy-u

Ispitivanje udarnog rada loma po Charpy-u provodi se s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Iznos udarnog rada loma pokazatelj je "žilavosti" ili "krhkosti" materijala udarno opterećenih epruveta s utorom [12]. Ispitivanje udarnog rada loma Charpyevim batom propisano je normom HRN EN ISO 148-1.

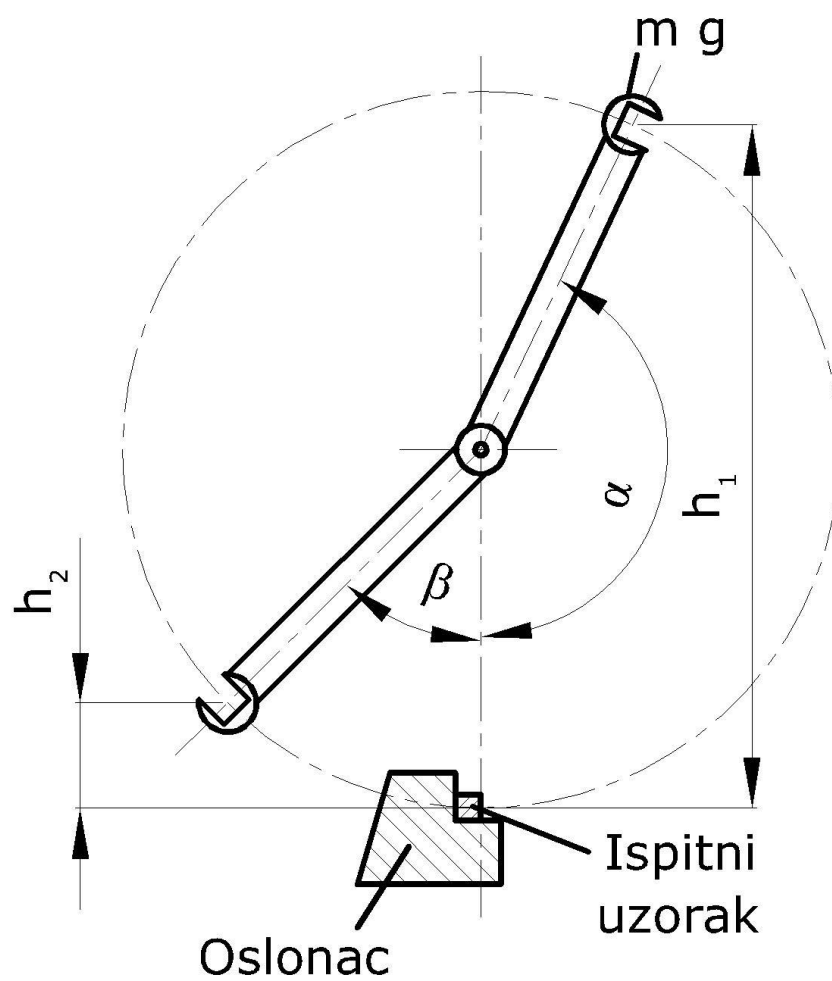
Ispituju se epruvete četvrtastog poprečnog presjeka. Zarez je smješten u centar ispitivanog uzorka, koji je oslonjen horizontalno u dvije točke. Bat težine G podiže se na visinu h_1 te s obzirom na ravninu u kojoj se nalazi ispitni uzorak, posjeduje potencijalnu energiju $G \cdot h_1$ ($N \cdot m = J$). Puštanjem bata iz početnog položaja njegova potencijalna energija prelazi u kinetičku. U najnižem položaju sva se potencijalna energija pretvorila u kinetičku. U tom trenutku brzina bata (v) iznosi 5,5 m/s. Ukoliko na oslonac nije postavljen ispitni uzorak bat se penje na istu visinu s koje je pušten, jasno ako se zanemari trenje u ležaju i otpor zraka [12].

Pri ispitivanju na osloncu je postavljena epruveta pa se za njezin lom utroši određen iznos kinetičke energije bata. U epruvetu udara bat specifične težine u stranu suprotno od zareza. Uslijed udarca epruveta puca u korijenu zareza ili je oštrica noža provlači savinutu, ali ne slomljenu, između oslonaca. Stoga se bat sada u uzlaznom dijelu penje na manju visinu od početne i dosiže visinu h_2 . Utrošena energija se zove udarni rad loma i određuje se prema sljedećem izrazu:

$$KU(V) = G \cdot h_1 - G \cdot h_2 = G \cdot (h_1 - h_2), J$$

gdje je $KU(V)$ apsorbirana energija; G je težina bata h_1 je početna visina bata; h_2 je kranja visina bata [12, 4]. Na slici 7 prikazano je ispitivanje udarnog rada loma po Charpy-u.

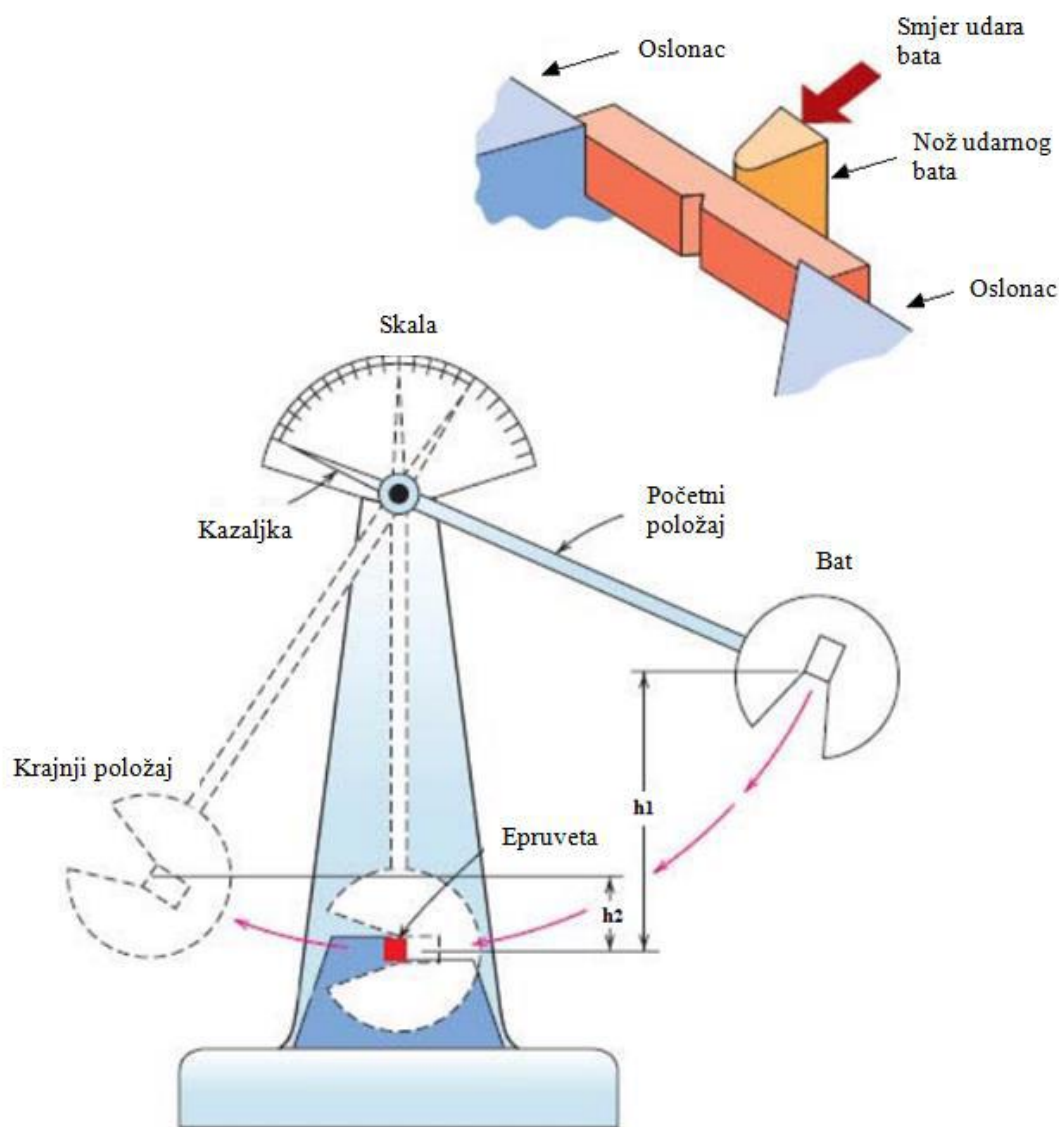
CHARPYJEVO KLATNO



Slika 7. Ispitivanje udarnog rada loma na Charpy-evom batu [13]

Na slici 8 je prikazan Charpy-ev bat i njegovi osnovni dijelovi:

- postolje s njihalom,
- udarni bat s nožem,
- oslonci epruvete,
- mjerna skala (analogna ili digitalna).



Slika 8. Charpy-ev bat [14]

Na slikama 9 i 10 prikazani su neki uređaji za ispitivanje Charpy metodom.



Slika 9. Uređaj za ispitivanje Charpy metodom, Tinius Olsen



Slika 10. Uređaj za ispitivanje Charpy metodom, Atico

2.2.1.1 Oblik i dimenzije ispitnog uzorka [9]

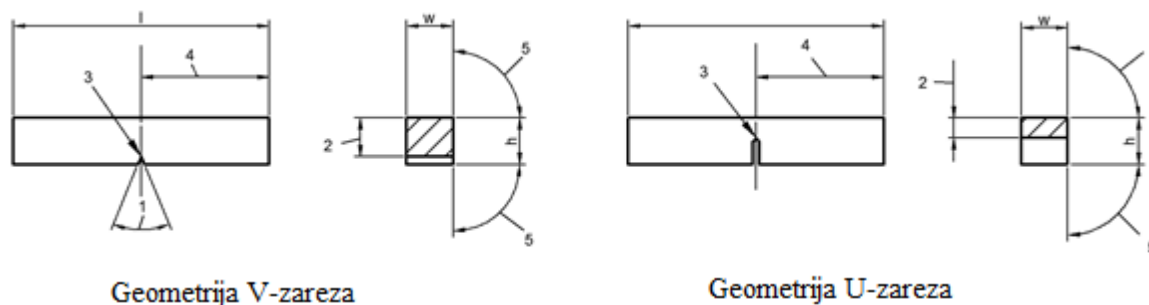
Standardni ispitni uzorak dužine je 55 mm te kvadratnog poprečnog presjeka širine i visine 10 mm. Na sredini ispitnog uzorka se nalazi zarez koji može biti u obliku slova „V“ (V-zarez) ili slova „U“ (U-zarez).

Ako se iz materijala ne može napraviti standardni ispitni uzorak koriste se uzorci reduciranog presjeka širine 7,5 mm, 5 mm, 2,5 mm.

Ispitni uzorak mora imati površinsku hrapavost R_a bolju od $5 \mu\text{m}$ na svim površinama osim bočnim.

Kada se ispituje toplinski obrađeni materijal, ispitni uzorak (uključujući i zarez) se strojno obrađuje nakon zadnje faze toplinske obrade, osim u slučaju kada je moguće dokazati da mehanička obrada prije toplinske obrade nema bitnog utjecaja na rezultate.

Zarez se mora pažljivo obraditi tako da na polumjeru korijena zarez nema tragova strojne obrade jer oni mogu imati štetan utjecaj na apsorbiranu (utrošenu) energiju. Ravnina simetrije zarez mora biti okomita na uzdužnu os ispitnog uzorka. Geometrija Charpy-evih epruveta s V- i U-zarezom predložena je na slici 11.



Slika 11. Ispitni uzorak [9]

V-zarez mora imati kut od 45° i dubinu od 2 mm te polumjer korijena od 0,25 mm. U-zarez mora imati dubinu 5 mm (osim ako nije drugačije određeno) i polumjer korijena od 1 mm.

U tablicama 1 i 2 su detaljno predložene dimenzije i tolerancije ispitnih uzoraka s V i U-zarezom.

Tablica 1. Dimenzije i tolerancije ispitnog uzorka (V-zarez) [9]

Oznaka	Simbol i broj	Ispitni uzorak s V-zarezom		
		Nazivna dimenzija	Tolerancije obrade	Klasa tolerancije ^a
Dužina	1	55 mm	$\pm 0,60$ mm	js15
Visina ^b	h	10 mm	$\pm 0,075$ mm	js12
Širina ^b	w			
- Standardni ispitni uzorak		10 mm	$\pm 0,11$ mm	js13
- Ispitni uzorak reduciranog presjeka		7,5 mm	$\pm 0,11$ mm	js13
- Ispitni uzorak reduciranog presjeka		5 mm	$\pm 0,06$ mm	js12
- Ispitni uzorak reduciranog presjeka		2,5 mm	$\pm 0,05$ mm	js12
Kut zarez	1	45°	$\pm 2^\circ$	-
Visina ispod zarez (visina uzorka minus dubina zarez)	2	8 mm	$\pm 0,075$ mm	js12
Polumjer zakrivljenosti vrha zarez	3	0,25 mm	$\pm 0,025$ mm	-
Udaljenost ravnine simetrije zarez i kraja uzorka ^b	4	27,5 mm	$\pm 0,42$ mm ^c	js15
Kut između ravnine simetrije zarez i uzdužne osi uzorka		90°	$\pm 2^\circ$	-
Kut između susjednih uzdužnih površina uzorka	5	90°	$\pm 2^\circ$	-

Tablica 2. Dimenzije i tolerancije ispitnog uzorka (U-zarez) [9]

Oznaka	Simbol i broj	Ispitni uzorak s U-zarezom		
		Nazivna dimenzija	Tolerancije obrade	Klasa tolerancije ^a
Dužina	1	55 mm	±0,60 mm	js15
Visina ^b	h	10 mm	±0,11 mm	js13
Širina ^b	w	10 mm	±0,11 mm	js13
Visina ispod zareza (visina uzorka minus dubina zareza)	2	5 mm	±0,09 mm	js13
Polumjer zakrivljenosti vrha zareza	3	1 mm	±0,07 mm	js12
Udaljenost ravnine simetrije zareza i kraja uzorka ^b	4	27,5 mm	±0,42 mm ^c	js15
Kut između ravnine simetrije zareza i uzdužne osi uzorka		90°	±2°	-
Kut između susjednih uzdužnih površina uzorka	5	90°	±2°	-
a – sukladno ISO 286-1 b – ispitni uzorak mora imati površinsku Ra hrapavost bolju od 5 µm, osim na krajevima c – kod strojeva s automatskim pozicioniranjem uzorka, preporuča se tolerancija ±0,165 mm umjesto ±0,42 mm				

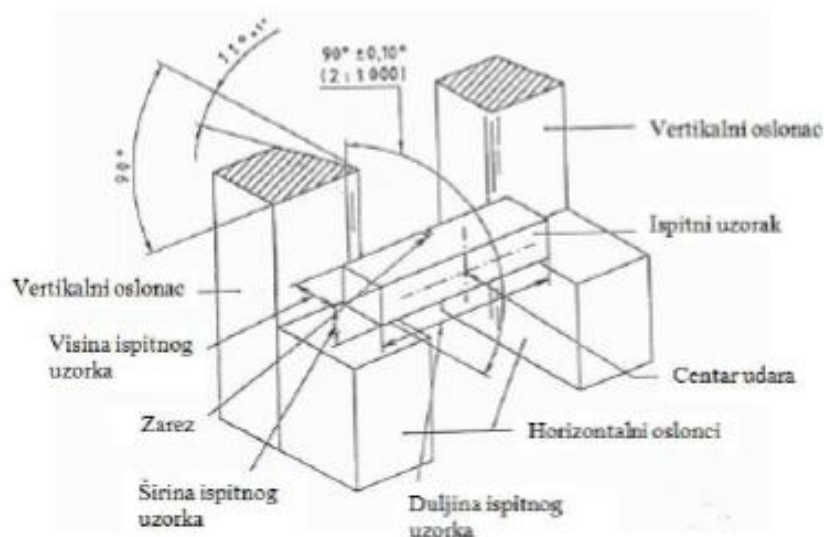
Prilikom izrade ispitnog uzorka potrebno je minimizirati bilo kakve promjene uzrokovane primjerice zagrijavanjem ili očvršćavanjem uslijed hladne deformacije. Prije ispitivanja ispitni uzorak se može označiti na bilo kojoj površini koja nije u kontaktu s horizontalnim i vertikalnim osloncima ili nožem da se izbjegne utjecaj plastične deformacije i površinskih nepravilnosti na apsorbiranu (utrošenu) energiju koja se mjeri tokom ispitivanja.

2.2.1.2 Mjerna oprema [9]

Mjerna oprema korištena u mjerenjima mora pratiti nacionalne i internacionalne standarde te mora biti umjerena unutar odgovarajućih intervala. Geometrija noža je propisana normom te nož može biti polumjera 2 mm ili 8 mm. Zbog toga se polumjer noža preporuča iskazati u obliku KV2 ili KV8.

2.2.1.3 Postupak ispitivanja [9]

Ispitni uzorak mora biti položen horizontalno između oslonaca ispitnog uređaja, s ravninom simetrije zarez unutar 0,5 mm od središta između oslonaca. Nož će udariti u ravninu simetrije zarez suprotno od zarez. Shematski prikaz oslonaca ispitnog uzorka dan je na slici 12.



Slika 12. Oslonci ispitnog uzorka [9]

2.2.1.4 Ispitna temperatura [9]

Ispitivanje se u pravilu provodi na temperaturi od 23 ± 5 °C osim ako nije drugačije navedeno. Temperatura ispitnog uzorka mora ostati u granicama ± 2 °C.

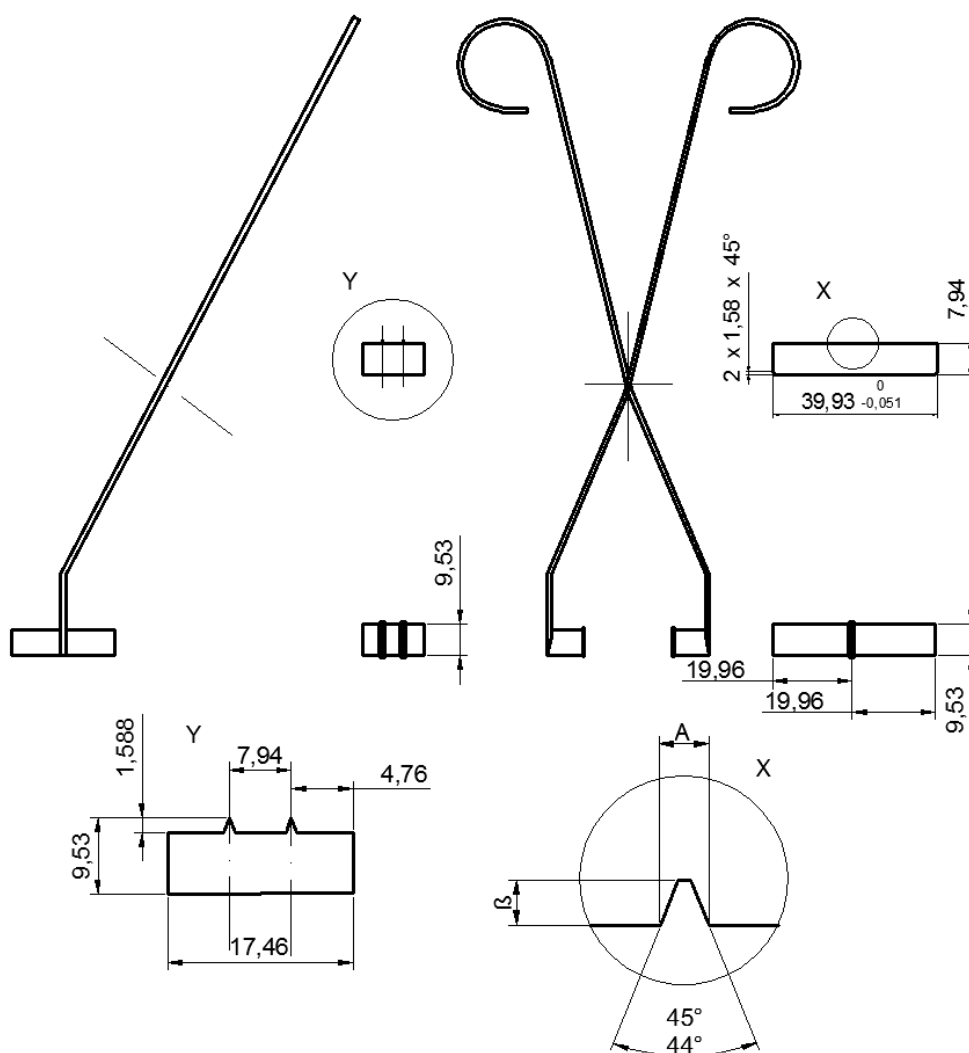
U slučaju zagrijavanja ili hlađenja korištenjem tekućeg medija ispitni uzorak mora biti smješten u posudu tako da leži na mrežici koja je barem 25 mm iznad dna posude i mora biti prekriven s najmanje 25 mm tekućine te udaljen od stranica posude barem 10 mm. Medij treba bilo kojom odgovarajućom metodom postepeno zagrijavati/hladiti dok ne dostigne određenu temperaturu. Uređaj za mjerenje temperature medija treba pozicionirati točno u centar skupine ispitnih uzoraka, a temperaturu medija treba održavati u granicama od ± 1 °C najmanje 5 min.

U slučaju zagrijavanja ili hlađenja korištenjem plinovitog medija ispitni uzorak u komori mora biti udaljen od najbliže površine minimalno 50 mm. Pojedinačni ispitni uzorci moraju biti razmaknuti barem 10 mm. Medij treba neprestano cirkulirati i održavati određenu temperaturu na neki od odgovarajućih načina. Uređaj za mjerenje temperature medija treba pozicionirati točno u centar skupine ispitnih uzoraka, a temperaturu plinovitog medija treba održavati u granicama od ± 1 °C barem 30 min.

2.2.1.5 Prenošnje ispitnog uzorka [9]

Kada se ispituje na temperaturi različitoj od okolišne ne smije proći više od 5 s od vađenja uzorka iz medija do udara noža. Uređaj za prijenos (hvataljke) uzorka mora biti tako konstruiran i korišten da održava temperaturu ispitnog uzorka unutar dozvoljenog temperaturnog područja. Dijelovi hvataljke kojima se prenosi uzorak također trebaju biti hlađeni ili zagrijavani, ovisno o vrsti ispitivanja. Mora se paziti da hvataljke prilikom prijenosa ne uzrokuju pukotine na uzorku.

Za ispitne uzorke s V-zarezom često se koriste samo-centrirajuće hvataljke za prijenos uzorka iz medija za zagrijavanje ili hlađenje na položaj za ispitivanje. Ovakve hvataljke eliminiraju moguće probleme nastale međudjelovanjem prelomljenih dijelova uzorka i uređaja za centriranje. Hvataljke ispitnog uzorka prikazane su na slici 13. Dimenzije hvataljki dane su u tablici 3.



Slika 13. Hvataljke ispitnog uzorka [9]

Tablica 3. Dimenzije hvataljki [9]

Širina uzorka	Širina baze A	Visina B
10	1,60 do 1,70	1,52 do 1,65
5	0,74 do 0,80	0,69 do 0,81
3	0,45 do 0,51	0,36 do 0,48

2.2.1.6 Zaglavljenje ispitnog uzroka [9]

U slučaju zaglavljenja ispitnog uzorka na uređaju, rezultate treba zanemariti, a uređaj potpuno pregledati radi oštećenja koja bi mogla utjecati na umjeravanje. Zaglavljenje se javlja u slučaju kada se prelomljeni ispitni uzorak nađe između gibajućih i negibajućih dijelova ispitnog uređaja. To može rezultirati značajnom apsorpcijom (utroškom) energije.

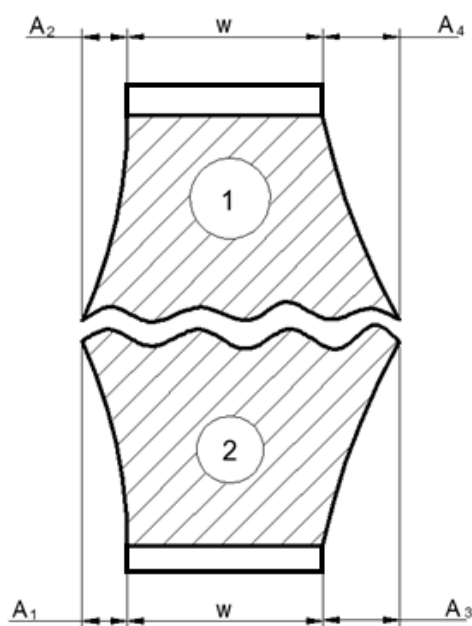
2.2.1.7 Lateralno (bočno) širenje [9]

Sposobnost materijala da se odupre lomu kada je podvrgnut troosnom naprezanju, poput onog u korijenu zarez Charpy-evog ispitnog uzorka, iskazuje se iznosom deformacije na mjestu loma. Deformacija nastaje kontrakcijom materijala. Pošto je teško mjeriti ovu deformaciju čak i nakon loma, mjeri se širenje koje se javlja na suprotnom kraju prijelomne plohe i ono se koristi kao mjera kontrakcije.

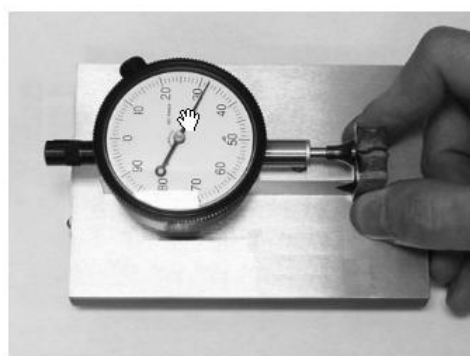
Kod metode mjerenja lateralnog (bočnog) širenja treba uzeti u obzir da je prijelomna ploha rijetko jednako proširena na obje strane ispitnog uzorka. Jedna polovica ispitnog uzorka može biti maksimalno proširena na obje strane, samo jednoj ili ni jednoj. Stoga se kao mjera širenja koristi veličina koja je jednaka zbroju većih od dvije vrijednosti na svakoj strani pri zasebnom mjerenju dvije polovice uzorka. Veličinu širenja na svakoj strani svake polovice uzorka treba mjeriti s obzirom na nedeformiranu stranu ispitnog uzorka. Širenje se može mjeriti pomoću mjernog sata nalik onom na slici 15. Mjerenje se provodi na dvije polovice uzorka. Prvo se provjeravaju strane okomite na zarez da bi se provjerilo da na ovim stranama nisu formirane nikakve neravnine tijekom ispitivanja; ako neravnine postoje, one se trebaju ukloniti, primjerice brušenjem brusnim papirom, ali tako da se ne bruse proširenja koja se mjere.

Zatim se dvije polovice uzorka stavljaju jedna na drugu tako da leže na površinama suprotnim zarezu. One se čvrsto pritisnu uz referentnu ravninu tako da proširenja leže naspram igle mjernog sata. Mjere se vrijednosti na istoj strani pri čemu veća vrijednost reprezentira širenje na toj strani. Postupak se ponavlja mjerenjem proširenja na drugoj strani i potom se zbrajaju veće vrijednosti. Na primjer ako je $A1 > A2$ i $A3 = A4$ tada je $LE = A1 + (A3 \text{ ili } A4)$, Ako je $A1 > A2$ i $A3 > A4$ onda je $LE = A1 + A3$.

Ako je jedno ili više proširenja ispitnog uzorka oštećeno u kontaktu s osloncima ispitni uzorak se ne smije mjeriti i to treba zabilježiti u izvješću o ispitivanju. Potrebno je izmjeriti svaki ispitni uzorak. Slika 14 prikazuje dvije prijelomne polovice Charpy-evog uzorka, a slika 15 prikazuje mjerni sat za mjerenje bočnog širenja.



Slika 14. Dvije prelomljene polovice Charpy-evog V-uzorka [9]



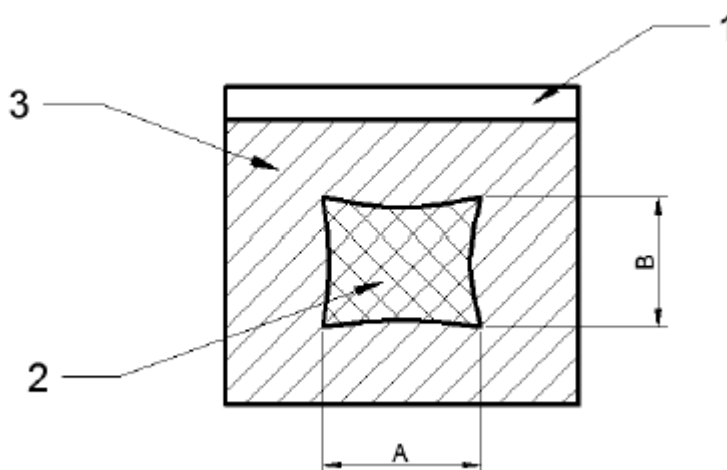
Slika 15. Mjerni sat za mjerenje bočnog širenja [9]

2.2.1.8 Pojava pukotine [9]

Prijelomna površina Charpy-evih uzoraka često sadrži određeni udio žilavog loma. Veći udio žilavog loma znači i veću žilavost materijala. Na većini uzoraka javlja se mješavina žilavog i krhkog loma. Procjena prijelomne površine je izrazito subjektivna. Shematski prikaz loma površine prikazan je na slici 16.

Udio žilavog prijeloma određuje se jednim od slijedećih načina:

- mjerenjem duljine i širine područja krhkog loma na prijelomnoj površini, kao što je prikazano na slici i određivanjem postotnog udjela smicanja iz tablice 4,
- uspoređivanjem prijelomne površine ispitnog uzorka s prikazima loma kao na slici 17,
- povećanjem prijelomne površine i uspoređivanje prekrivanjem referentnim prikazom loma, ili mjerenjem postotka krhkog loma pomoću planimetra iz čega se računa postotni udio žilavog loma,
- fotografiranjem prijelomne površine uz odgovarajuće povećanje i mjerenjem postotka krhkog loma pomoću planimetra iz čega se računa postotni udio žilavog loma,
- mjerenjem postotka žilavog loma uređajem za analizu slike.



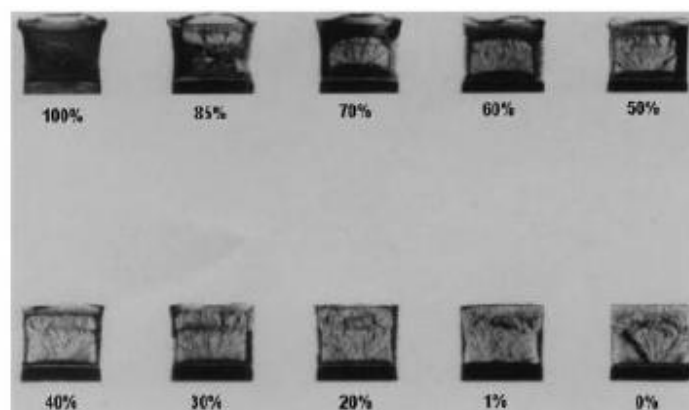
Slika 16. Određivanje udjela žilavog loma [9]

1. Zarez
2. Površina krhkog loma
3. Površina žilavog loma

Tablica 4 prikazuje postotak žilavog loma.

Tablica 4. Postotak žilavog loma [9]

B mm	A mm																		
	Postotak smičnog loma																		
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
1	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1,5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	86	75
2,5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3,5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4,5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5,5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6,5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7,5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0
100 % smični prijelom se javlja kada su vrijednosti A ili B jednake nuli																			



Slika 17. Prikaz prijelomnih površina te postoci [9]

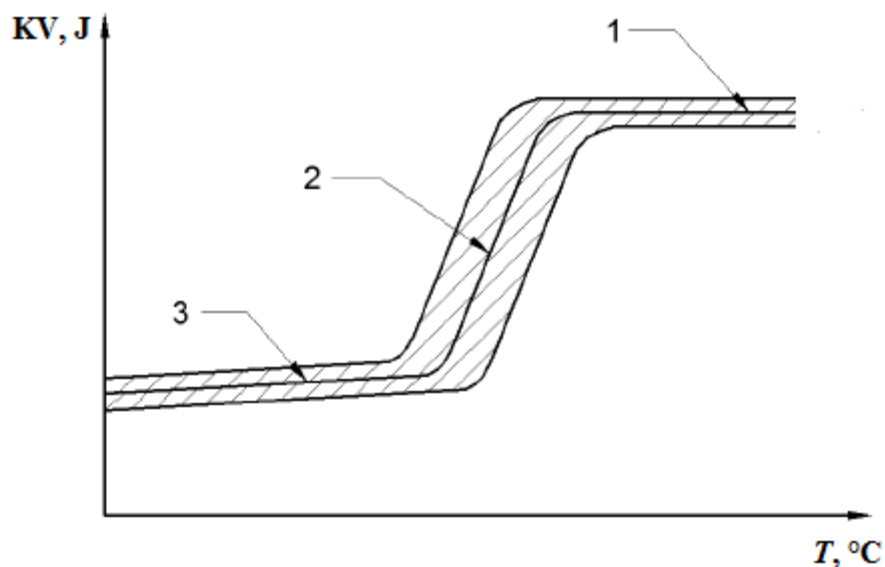
Slika 18 prikazuje vodič za utvrđivanje vrste prijelomnih površina.



Slika 18. Vodič za utvrđivanje vrste prijelomnih površina [9]

2.2.1.9 Apsorbirana energija u ovisnosti o prijelaznoj temperaturi [9]

Krivulja apsorbirane energije u ovisnosti o temperaturi prikazuje apsorbiranu energiju kao funkciju ispitne temperature. Krivulja se dobiva povlačenjem linije kroz pojedine vrijednosti. Oblik krivulje te raspodjela rezultata ovise o materijalu, obliku uzorka i brzini udara. U slučaju da krivulja ima prijelaznu zonu potrebno je razlikovati donji nivo, prijelaznu zonu i gornji nivo. Opći prikaz krivulje dan je na slici 19.



Slika 19. Shematski prikaz krivulje apsorbirane energije i temperature [9]

KV- udarni rad loma

T- temperatura

- 1- gornji nivo
- 2- prijelazna zona
- 3- donji nivo

Prijelazna temperatura (T_p) karakterizira položaj bržeg porasta krivulje „apsorbirana energija-temperatura“. Budući da se brži porast obično ostvaruje preko šireg temperaturnog područja, u principu nema prihvatljive definicije prijelazne temperature. Stoga se za određivanje prijelazne temperature koriste slijedeći kriteriji:

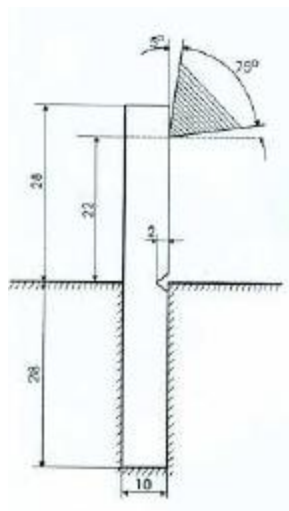
Prijelazna temperatura (T_p) je temperatura pri kojoj se:

- a) dosegne određena vrijednost apsorbirane (utrošene) energije (npr. $KV8 = 27 \text{ J}$),
- b) dosegne određeni postotak apsorbirane (utrošene) energije u gornjem nivou krivulje (npr. 50 %),
- c) javi određeni udio žilavog prijeloma (npr. 50 %),
- d) dosegne određena vrijednost bočnog širenja (npr. 0,9 mm).

2.2.2 Ispitivanje udarnog rada loma po Izodu

Izod metoda za određivanje žilavosti materijala je prvi put opisana 1903. godine sa strane engleskog inženjera Edwin Gilbert Izod-a. Udarni rad loma prema Izodu je mjerilo otpora materijala prema udarnom opterećenju i definiran je utrošenom kinetičkom energijom potrebnom za lom ispitnog uzorka. Izod metoda je najveću zastupljenost našla u Americi gdje se i danas najviše koristi. Vrlo je slična Charpy metodi. Razlikuje se samo u načinu učvršćenja epruvete [6].

Dok je Charpy kod testiranja koristio dva oslonca razmaknuta 40mm za pridržavanje epruvete, kod ovog ispitivanja ispitni se uzorak konzolno učvrsti te gornji kraj s zarezom stoji vertikalno, a zarez je u ovom slučaju na strani udara. Slika 20 prikazuje ispitivanje po Izodu.

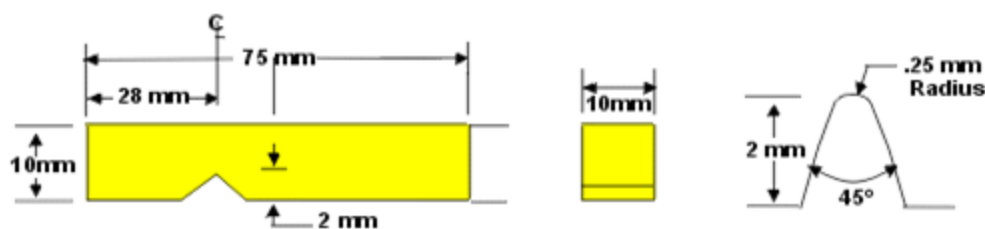


Slika 20. Prikaz ispitivanja po Izodu [7]

Ispitni uzorci se, kao i kod Charpy metode, mogu razlikovati oblikom što najviše ovisi o vrsti ispitnog materijala. Za razliku od uzoraka kod Charpy metode, kod Izod metode jedna strana uzorka je duža. Metalni uzorci su uglavnom kvadratnog presjeka s početnim "V" zarezom, dok su uzorci od plastike i keramike uglavnom pravokutni [4].

Izod uređaj za ispitivanje žilavosti u većini slučajeva ima mogućnost promjene udarne energije bata dodavanjem ili oduzimanjem mase. Česti su slučajevi da je kod testiranja uzoraka potrebno postepeno dodavati masu kako bi došlo do puknuća epruvete.

Slika 21 prikazuje oblik i dimenzije uzorka, a slika 22 primjer uređaja za ispitivanje po Izodu.



Slika 21. Ispitni uzorak kod Izod metode [8]

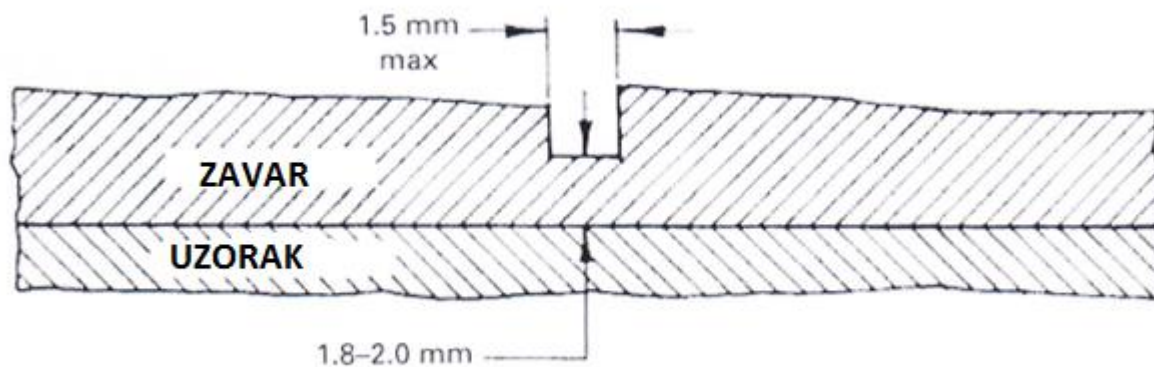


Slika 22. Uređaj za ispitivanje Izod metodom [9]

2.2.3 Pellini metoda (test padajućeg utega)

Ispitivanje po Peliniju je razvijeno u mornaričkom ispitnom laboratoriju u Washingtonu kao jednostavna metoda za određivanje temperature nulte duktilnosti materijala (NDTT). Temperatura nulte duktilnosti je definirana 1950. godine kao temperatura pri kojoj ploča ostaje ravna nakon loma eksplozijom, odnosno širenje pukotine nastaje samo u prisutnosti elastičnih naprezanja.

Uzorak se sastoji od čelične ploče na čiju površinu je navaren krhki zavar. Na zavaru je urezan zarez kako bi se ograničilo mjesto prijeloma (slika 23).



Slika 23. Uzorak kod testa padajućim utegom [4]

Ispitivanje se izvodi tako da uteg slobodnim padom udara u stranu uzorka suprotno od nastajanja pukotine. Temperatura nulte duktilnosti (NDT) je temperatura ispod koje je visoka vjerojatnost pojave krhkog loma. Iznad te temperature žilavost čelika ubrzano raste sa porastom temperature. Ova prijelazna temperatura je mnogo preciznija nego prijelazna temperatura po Charpy metodi. Metodom padajućeg utega nastaje oštra pukotina koja se u krhko navarenom materijalu ubrzano širi od zareza. Metoda padajućeg utega osigurava korisnu vezu između kvalitativnog pristupa prijelazne temperature te kvantitativnog pristupa prema pukotini.

Metoda pruža jednostavna sredstva kvalitetne kontrole kroz NDT temperaturu, koja se može primjenjivati za razne grupe čelika. Za neke čelike, indentifikacija NDT temperature ukazuje na sigurne minimalne radne temperature za neko opterećenje. Metoda padajućeg utega je primjenjiva primarno za čelike debljine stijenke između 18-50 mm [4]. Primjer uređaja za ispitivanje te ispitni uzorci prikazani su na slikama 24 i 25.



Slika 24. Pellini ispitni uređaj [10]



Slika 25. Ispitni uzorci Pellini metode [11]

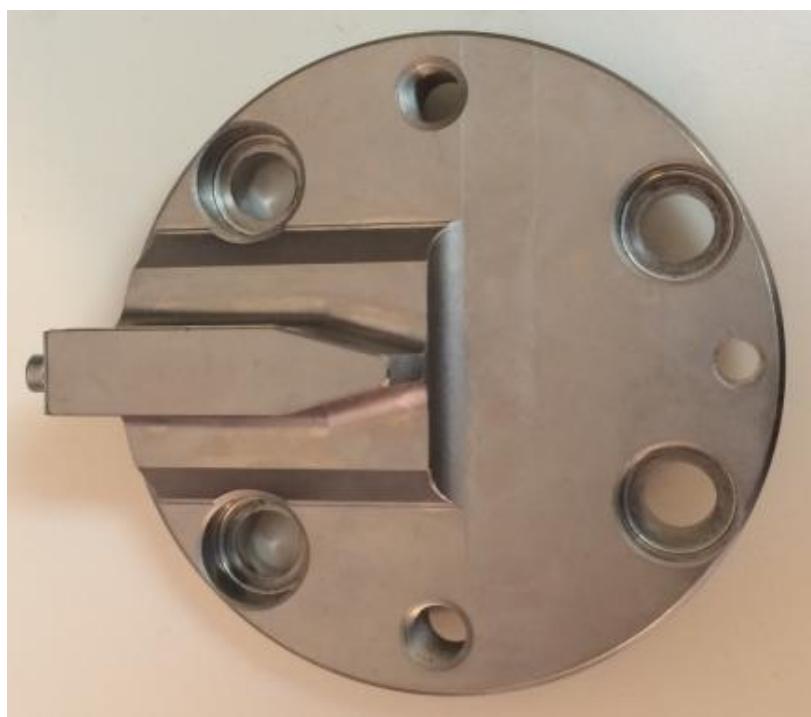
2.2.4 Ispitivanje udarne radnje loma instrumentiranom Charpy metodom

Ispitivanje udarne radnje loma po Charpy-u je jedna od najčešćih metoda za karakterizaciju mehaničkog ponašanja materijala. Glavna prednost metode je relativno jednostavna (voditi računa o kutu!) priprema uzoraka, lakoća izvođenja ispitivanja, brzina te niski troškovi. Međutim, valja imati na umu kako uobičajena Charpy metoda daje informacije samo komparativnog karaktera. Naime, konvencionalna metode ispitivanja žilavosti(bez instrumentacije) mjeri energiju potrebnu za lom epruvete pod dinamičkim opterećenjem. Prijelazna temperatura, npr. ovisi o debljini uzorka (treba koristiti standardne uzorke); dakle, ta temperatura može služiti samo za usporedbu npr. dva čelika, ali nije apsolutno svojstvo materijala. Osim toga, uobičajena Charpy metoda mjeri ukupnu utrošenu energiju, koja je suma energija utrošenih u nastajanje i širenje pukotine. S obzirom na ovaj problem (to nije problem) razvijena je instrumentirana Charpy metoda (slika 26) za puno točnije shvaćanje dinamičkog loma potrebno je instrumentizirati Charpy njihalo [4]. Instrumentirano ispitivanje na uzorcima sa namjerno napravljenim pukotinama otvorilo je put prema analizi parametara mehanike loma važnih kod stvaranja i rasta pukotine pri velikim opterećenjima. Ispitivanje se provodi sukladno normi HRN EN ISO 14556 (Ispitivanje udarne radnje loma ispitnog uzorka s V-zarezom Charpy-evim njihalom-Instrumentirana ispitna metoda). Ispitni uzorak je Charpyjev uzorak sa V zarezom, sukladan normi HRN EN ISO 148-1.



Slika 26. Instrumentirani Charpy-ev bat [16]

Instrumentirana metoda ispitivanja udarnog rada loma po Charpy-u ne samo da mjeri ukupnu energiju potrebnu za lom epruvete, nego i energiju pri stvaranju pukotine u korijenu zareza, energiju pri maksimalnoj sili i energiju na kraju nestabilnog loma. Metoda zahtjeva korištenje noževa koji imaju ugrađene tenzometre koji omogućuju dobivanje krivulje opterećenja kroz cijeli postupak ispitivanja. Time je omogućeno dobivanje podataka o sili, pomaku, vremenu te energijama koje mogu kolerirati sa mehaničkim svojstvima kao što su žilavost, lomna žilavost K_{IC} , otpornost prema lomu, itd [17].



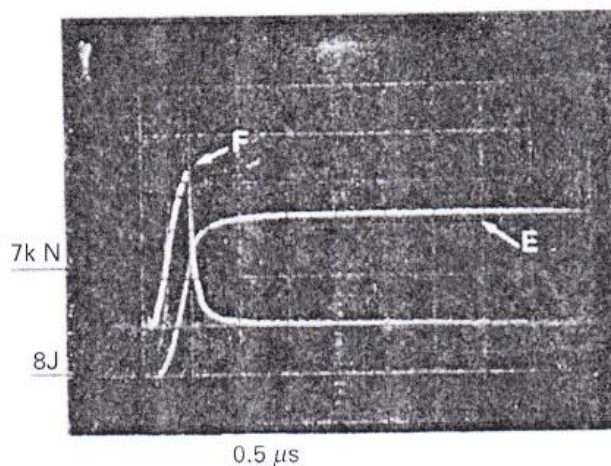
Slika 27. Instrumentirani nož

Prednost instrumentirane metode je zapis u obliku krivulje opterećenja u ovisnosti o vremenu pomoću koje se može mjeriti apsorbirana energija tokom izvođenja ispitivanja. Metoda uz utrošenu energiju sadrži i promjene u primijenjenom opterećenju sa vremenom.

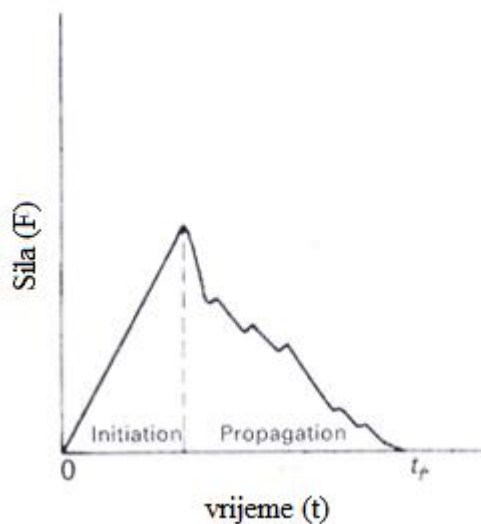
Standardni zapis uključuje sile, energije te pomake kroz vrijeme izvođenja ispitivanja. Ti parametri daju uvid u mehanizme pojave pukotine [4].

Instrumentacija uključuje snimanje signala iz dinamometra na njihalu pomoću osciloskopa u obliku vremenske krivulje opterećenja ispitivanog uzorka.

Slika 28 prikazuje tipičan zapis osciloskopa, a slika 29 prikazuje shematski prikaz zapisa. Ova vrsta krivulje može osigurati informacije o opterećenju kod opće granice razvlačenja, maksimalnog opterećenja, opterećenja pri lomu, itd [4].



Slika 28. Zapis osciloskopa [4]



Slika 29. Shematski prikaz zapisa [4]

Energija utrošena u udaru također se može dobiti integracijom vremenske krivulje opterećenja. Iz ove krivulje može se dobiti energija loma ako je poznata brzina njihala. Ako pretpostavimo da je brzina prilikom ispitivanja konstantna, možemo pisati da je energija loma [4]:

$$E' = V_0 \cdot \int_0^t P dt$$

Gdje je E' ukupna energija loma, bazirana na konstantnoj brzini njihala, V_0 je početna brzina njihala, P je trenutno opterećenje, a t je vrijeme.

Ispitivanje se sastoji od mjerenja sile udara, u odnosu savojnog pomaka ispitnog uzorka, tokom testa, sukladno normi HRN EN ISO 148-1. Područje ispod krivulje „sila-pomak“ definira energiju apsorbiranu u ispitnom uzorku [4].

Za različite čelike, te različite temperature, krivulje „sila-pomak“ mogu biti sasvim različite, iako su područja ispod krivulja, te apsorbirane energije identične. Ako su krivulje podijeljene na karakteristične dijelove, mogu se provesti različite faze ispitivanja sa karakterističnim pojavama koje nam omogućuju značajne informacije o ponašanju pukotine ispitnog uzorka.

Kod većine ispitivanja izvođenih u prošlosti koristilo se filtriranje signala kako bi se dobio gladi dinamički odziv. Korištenjem modernih tenzometara te pojačala, filtriranje signala više nije potrebno. Između ostalog, filtriranje nije poželjno u mnogim primjenama zbog toga što rezultira slabljenjem signala te iskrivljenjem krivulje što utječe na točnost mjerenja apsorbirane energije [17].

2.2.4.1 Ispitni uređaj [18]

Prilikom ispitivanja se koristi Charpy-ev bat koji ima karakteristike sukladno normi HRN EN ISO 148-2), koji je ujedno i instrumentirani kako bi odredili krivulje „sila-vrijeme“ ili „sila-pomak“. Potom se napravi usporedba ukupne energije udara (W_t), dobivene instrumentiranom metodom, sa apsorbiranom energijom dobivenom na analognom brojčaniku.

Vrijednosti između instrumentirane metode te kružne skale su približno jednake.

Mogu se očekivati različita očitavanja. Ako odstupanje između vrijednosti prelazi ± 5 J, potrebno je ispitati:

- trenje uređaja
- kalibraciju mjernog sustava
- softver

Vrlo je važna mjerna sljedivost. Oprema korištena za umjeravanje treba slijediti nacionalne ili internacionalne standarde mjeriteljstva.

2.2.4.2 Mjerenje sile [18]

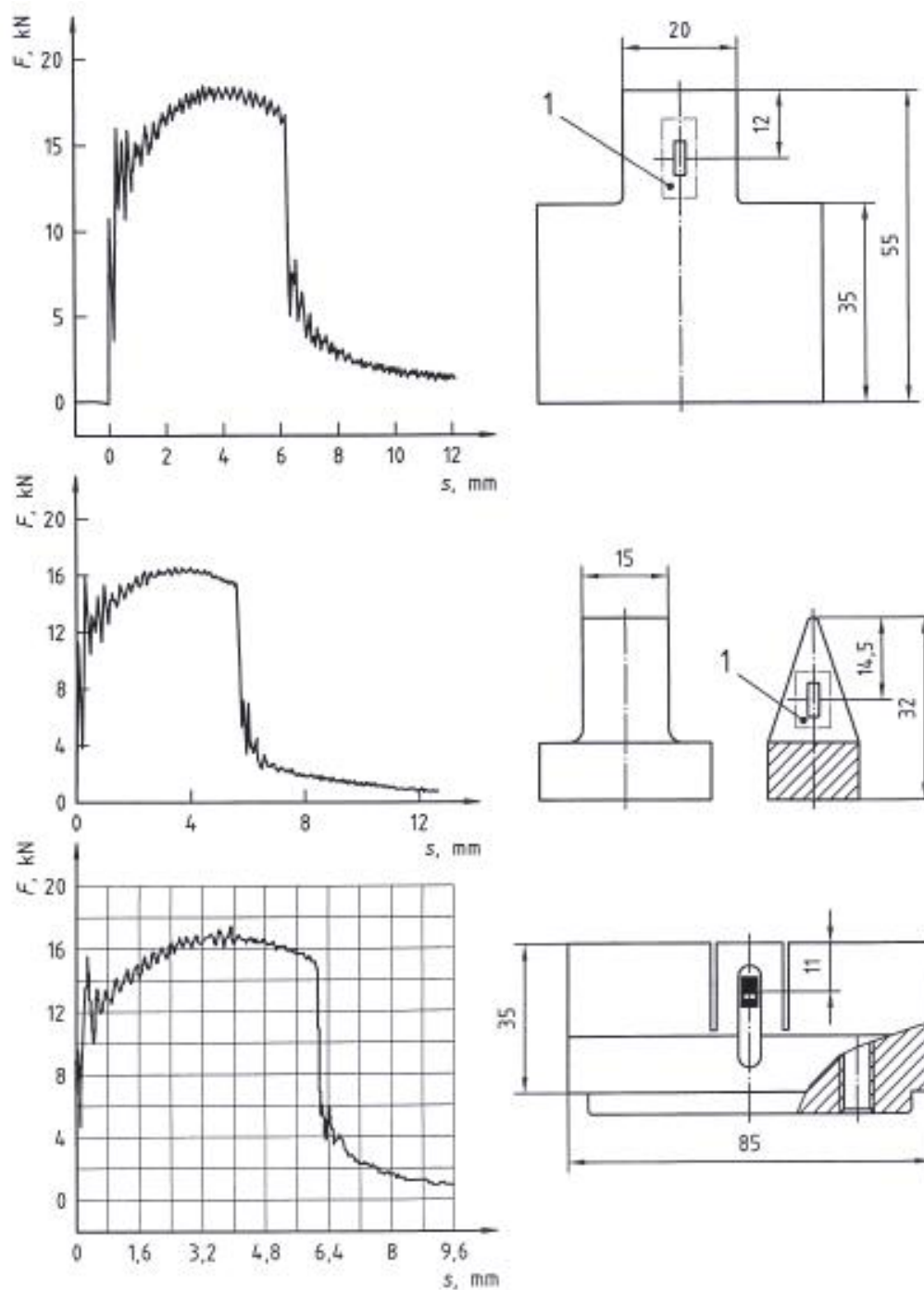
Mjerenje sile se obično postiže korištenjem dvaju aktivnih električki otpornih tenzometara za mjerenje naprezanja pričvršćenih na standardni nož bata kako bi tvorili pretvornik sile. Odgovarajuća konstrukcija noža te pridružene krivulje dana je na slici 30.

Potpuno zatvoreni krug napravljen je sa dva podjednako napregnuta tenzometra (aktivna) vezana sa suprotne strane noža, te sa dva kompenzacijska (pasivna) tenzometra.

Sustav mjerenja sile (instrumentirani bat, pojačalo, sustav za snimanje) moraju imati odaziv od najmanje 100 kHz, što odgovara vremenu porasta (t_r), ne višem od 3,5 μ s

Dinamička procjena mjerenja lanca sile može biti pojednostavljena mjerenjem vrijednosti prvog početnog vrha. Iskustveno, dinamika mjernog lanca može se smatrati zadovoljavajućom ako čelični ispitni uzorak sa V zarezom pokaže početni vrh veći od 8 kN prilikom brzine udara između 5 m/s i 5,5 m/s. Ovo vrijedi ako su središta aktivnih mjernih uređaja udaljena između 11 mm i 15 mm od kontaktne točke bata.

Instrumentacija noža mora biti raspoređena tako da daje odgovarajući nazivni raspon sile. Instrumentirani nož mora biti konstruiran tako da minimizira osjetljivost na nesimetrična opterećenja. Iskustvo govori kako se kod korištenja uzorka sa V zarezom, pojavljuje nazivna sila udara između 10 kN i 40kN za sve tipove čelika.

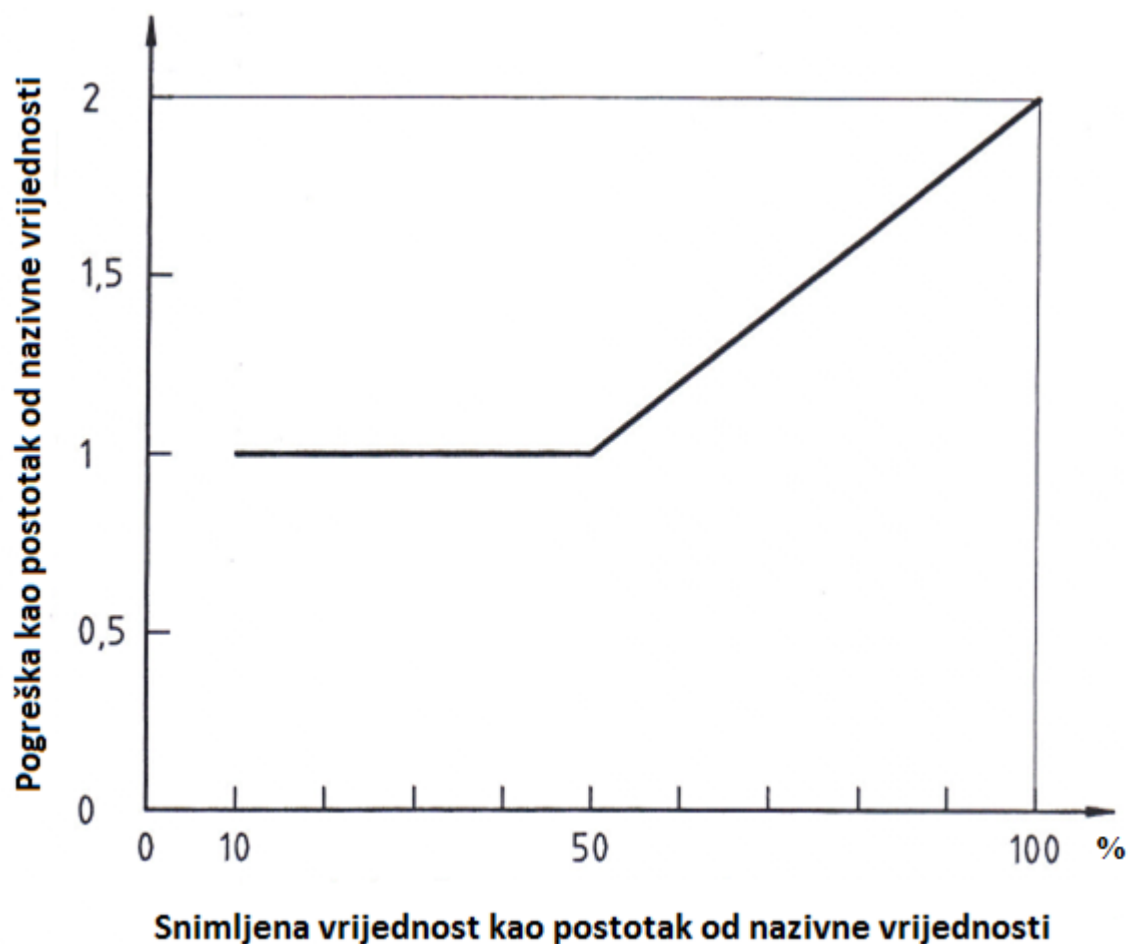


Slika 30. Konstrukcija instrumentiranog noža te pridružene krivulje [18]

2.2.4.3 Umjeravanje [18]

Umjeravanje snimača te mjernog sustava se može, u praksi, izvesti statički u suglasnosti sa zahtjevima točnosti danim ispod. Preporučeno je da se umjeravanje sile izvede sa nožem ugrađenim u sklop bata.

Statička linearnost i pogreška histereze ugrađenog instrumentiranog noža, uključujući sve dijelove mjernog sustava sve do aparature za snimanje (printer, ploter itd.), trebaju biti unutar 2 % snimljene sile, između 50 % i 100 % nazivnog raspona sile, te unutar ± 1 % cijele skale vrijednosti sile između 10 % i 50 % nazivnog raspona sile (slika 31). Za instrumentirani nož bez popratnih dijelova, preporuča se da točnost bude ± 1 % od snimljene vrijednosti između 10 % i 100 % nazivnog raspona.



Slika 31. Dopustiva pogreška snimljene vrijednosti unutar nazivnog raspona sile [18]

2.2.4.4 Mjerenje pomaka [18]

Pomak se lako utvrdi iz dijagrama „sila-vrijeme“. Također se može utvrditi iz bezkontaktnih mjerenja pomaka noža, u odnosu na oslonac, koristeći optičke, induktivne i kapacitivne metode. Karakteristike prijenosa signala sustava za mjerenja pomaka trebaju odgovarati onima iz sustava mjerenja sile u svrhu stvaranja dvaju sustava mjerenja sinkronim. Sustav mjerenja pomaka treba biti konstruiran za nominalne vrijednosti sve do 30 mm; pogreške linearnosti u mjernom sustavu moraju dati mjerne vrijednosti unutar $\pm 2\%$ u rasponu od 1 do 30 mm.

Dinamičko umjeravanje pomaka sustava može biti postignuta otpuštanjem njihala bez ispitnog uzorka u uređaju, gdje je brzina određena sa:

$$v_0 = \sqrt{2g_n h}$$

Zabilježeni signal brzine kada njihalo prođe kroz najnižu točku mora odgovarati brzini v_0 .

Preporučeno je da se pomaci između 0 mm i 1 mm utvrde iz mjerenja vremena te brzine njihala. Iz tog razloga se koristi pojednostavljeni izraz:

$$s = v_0(t - t_0)$$

Nesukladnost kod ove aproksimacije je manja od 2 %, ako je odgovarajuća parcijalna energija udara manja od 4 % od efektivne potencijalne energije bata.

2.2.4.5 Aparatura za snimanje[18]

Snimanje dinamičkog signala je po mogućnosti ostvareno snimačima za digitalnu pohranu, sa mogućnošću printanja ili plotanja rezultata ispitivanja. U svrhu postizanja zahtijevanih točnosti sa digitalnim mjerenjem te sustavom snimanja, potreban je najmanje 8 bitni pretvarač, sa brzinom prikupljanja podataka od 250 kHz (4 μ s); međutim, preporuča se 12 bitni pretvarač. Potreban je kapacitet pohrane od 2000 podataka za svaki signal kroz vremenski period od 8 ms.

Za signale manje od 8 ms, kapacitet pohrane može biti smanjen. Kada su vrijednosti iz dijagrama „sila-pomak“ utvrđene, dovoljna preciznost se postiže reprodukcijom dijagrama najmanje 100x100 mm.

Preporučeno je da se umjeravanje instrumentirane opreme provodi u intervalima ne dužim od 12 mjeseci ili svaki put kad se stroj rastavlja, miče, popravlja ili podešava. U slučaju zamjene bata, preporuča se umjeravanje, osim ako se može dokazati da nije potrebno.

2.2.4.6 Prikaz rezultata [18]

Ako pomak nije direktno mjereno, potrebno je izračunati krivulje „sila-pomak“ prema danom izrazu. Veza „sila-vrijeme“ mjerena na batu je proporcionalna ubrzanju. Ako pretpostavimo da imamo kruto njihalo mase m , početnu brzinu njihala v_0 , vrijeme t , te vrijeme početka deformacije t_0 , pomak savijanja uzorka računa se prema izrazima:

$$v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt$$

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt$$

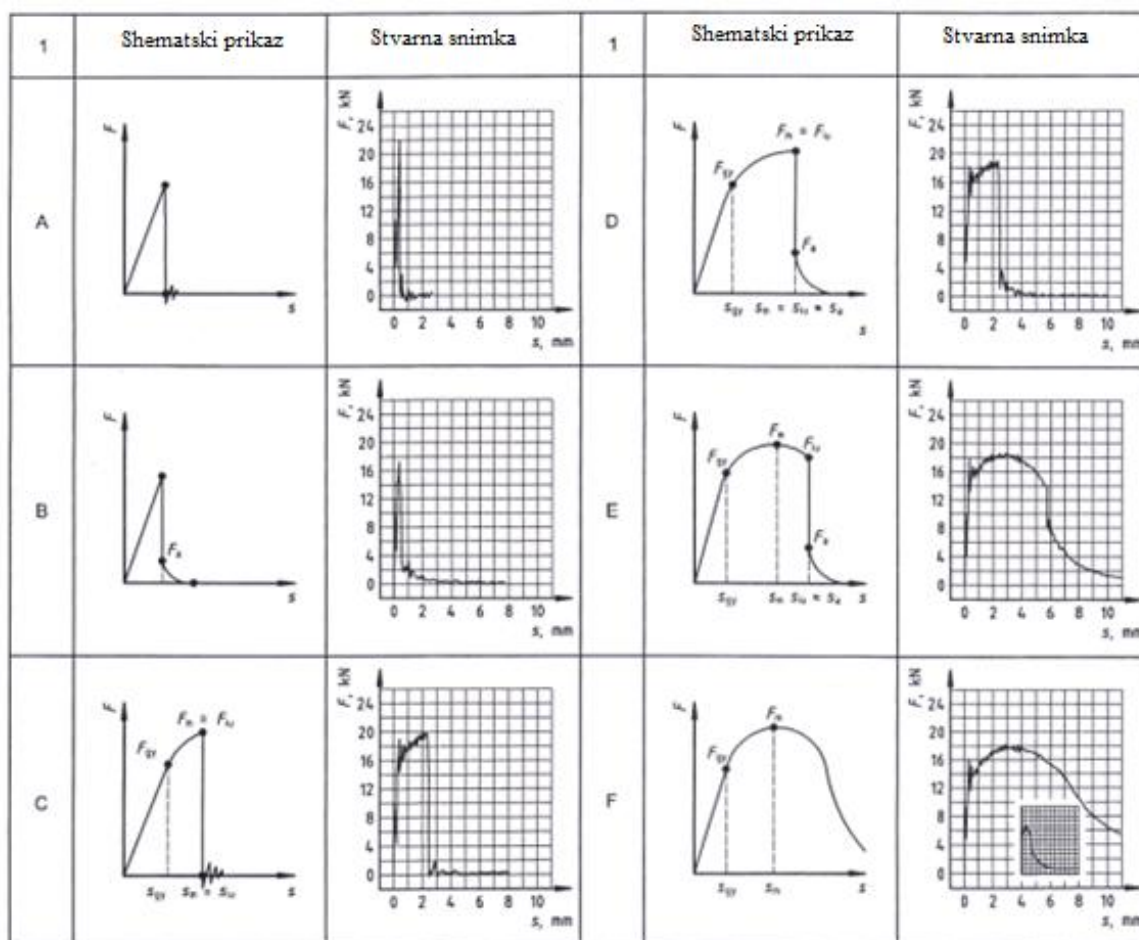
Različiti tipovi karakterističnih krivulja „sila-pomak“ dani su na slici 32, u svrhu pojednostavljenja procjene i izvještaja.

Mogu biti raspoređene po približnom redoslijedu u vezi sa krivuljom energije udara:

- Tip A i B Donji nivo
- Tip C,D i E Prijelazni nivo
- Tip F Gornji nivo

Kod krivulje A pojavljuje se samo nestabilno širenje pukotine. Kod krivulja B, C, D i E dolazi do pojavljivanja stabilnih i nestabilnih širenja pukotina. Kod tipa krivulje F pojavljuje se samo stabilno širenje pukotine.

Vrsta krivulje se određuje pomoću shematskog prikaza danim na slici 32. Uvjet za daljnju procjenu vrste krivulje je prisutnost sile razvlačenja F_{gy} .



Slika 32. Prikaz karakterističnih krivulja dobivenih instrumentiranom Charpy-evom metodom [18]

Određivanje karakterističnih vrijednosti sile

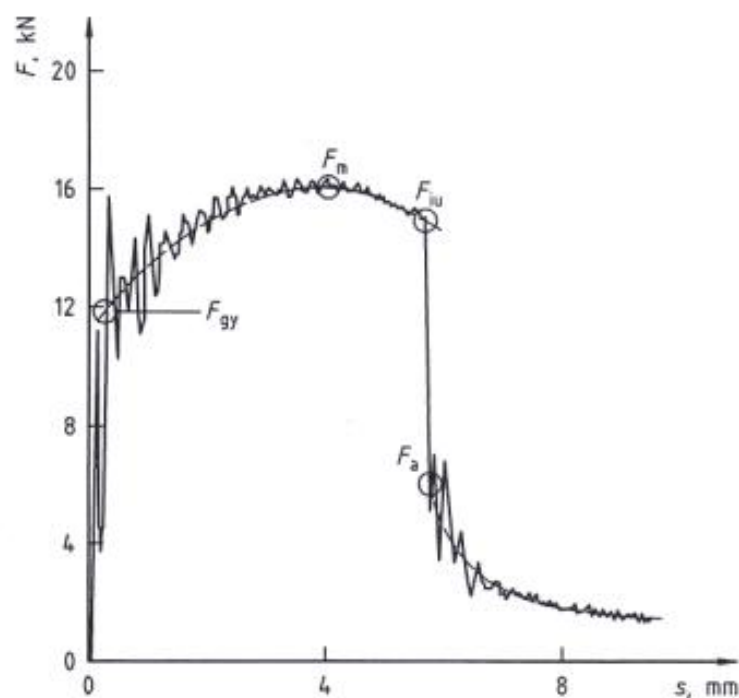
Sila razvlačenja (F_{gy}) određuje se na sjecištu stepenastog rastućeg dijela drugog vrha krivulje i nelinearnim regresijskim pravcem kroz oscilirajuću krivulju „sila-pomak“.

Maksimalna sila (F_m) određuje se kao maksimalna vrijednost na krivulji.

Sila pri početku stvaranja pukotine (F_{iu}) određuje se na sjecištu nelinearnog regresijskog pravca i strmom dijelu padajuće krivulje „sila- pomak“.

Sila na kraju nestabilnog loma (F_a) određuje se na sjecištu strmog dijela krivulje „sila-pomak“ i nelinearnog regresijskog pravca.

Prikaz krivulje sa karakterističnim silama dan je na slici 33.



Slika 33. Prikaz krivulje sa karakterističnim silama [18]

Određivanje karakterističnih vrijednosti pomaka

Karakteristične vrijednosti pomaka su vrijednosti sila preslikanih na apscisu dijagrama „sila-pomak“.

Pomak (s_{gy}) se može približno odrediti jedino korištenjem uobičajene mjerne aparature. Stoga se s_{gy} obično ne koristi.

Zbog strmog pada krivulje između F_{iu} i F_a , vrijednosti s_{iu} te s_a su približno jednake.

Ukupni pomak, s_t , može se odrediti samo ako se ispitni uzorak prilikom ispitivanja potpuno slomi. U tom slučaju se odgovarajuća krivulja asimptotski približava sili $F = 0$

Određivanje karakterističnih vrijednosti energije udara

Energija pri maksimalnoj sili (W_m) određuje se pronalaskom površine ispod krivulje od $s = 0$ do $s = s_m$.

Energija pri nastajanju pukotine (W_{iu}) određuje se pronalaskom površine ispod krivulje od $s = 0$ do $s = s_{iu}$.

Energija na kraju nestabilnog loma (W_a) određuje se pronalaskom površine ispod krivulje od $s = 0$ do $s = s_a$.

Zbog strmog pada krivulje između F_{iu} i F_a , vrijednosti W_{iu} te W_a su približno jednake.

Ukupna energija udara (W_t) određuje se pronalaskom površine ispod krivulje od $s = 0$ do $s = s_t$.

Određivanje proporcija površine žilavog loma

Ako se ne pojavi strmi pad sile na krivulji kao u slučaju F na slici 32, to može značiti da je u potpunosti nastupio žilavi lom. Ako se pojavi strmi pad sile, tada iznos pada, u vezi sa drugim karakterističnim vrijednostima sile omogućuje približno izračunavanje udjela površine žilavog loma prema formuli:

$$\text{Površina žilavog loma} = \left[1 - \frac{F_{iu} - F_a}{F_m} \right] \times 100\%$$

3. PRIMJENA REFERENTNIH MATERIJALA PRI PROVJERI CHARPY-EVOG BATA

U području mehaničkih ispitivanja, certificirani referentni materijali (CRM) su važan alat za uspostavljanje povjerenja i sljedivosti rezultata ispitivanja. Ispitne metode su obično definirane međunarodnim normama [19].

Metode provjere [19]:

- Prva metoda koristi uređaje za direktnu provjeru koja je u skladnosti sa nacionalnim standardom. Direktne metode se koriste onda kada se uređaj postavlja ili popravlja te kada indirektna metoda daje nesukladnost rezultata,
- Druga metoda je indirektna provjera korištenjem referentnih epruveta kako bi se provjerila točnost pokazivanja na mjernoj skali.

3.1 Zahtjevi za referentne materijale

Priprema i karakterizacija ispitnih uzoraka za indirektnu provjeru uređaja za ispitivanje definirana je standardom HRN EN ISO 148-3:2008. Uzorak mora biti što homogenije strukture. Raspone apsorbiranih energija koje se koriste u indirektnoj provjeri određene su standardom HRN EN ISO 148-3 te su dani u tablici 5.

Tablica 5. Dozvoljeni rasponi apsorbirane energije [19]

Razina energije	Raspon apsorbirane energije
Niska	< 30 J
Srednja	≥ 30 - 110 J
Visoka	≥ 110 – 200 J
Vrlo visoka	≥ 200 J

Jedan referentni komplet sadrži pet uzoraka. Komplet sadrži certifikat koji pruža informacije o proizvodnom postupku, certificiranoj referentnoj vrijednosti, te o mjernoj nesigurnosti (slika 34).



Slika 34. Certifikat sa referentnim uzorcima [20]

Referentni uzorci se proizvode u seriji od 2000 komada te se iz te serije uzima komplet od 25 uzoraka slučajnim odabirom. Uzorci se ispituju kako bi se mjerila apsorbirana energija.

Ti kompleti se ispituju na jednom ili više strojeva. Prosječna vrijednost svih rezultata ispitivanja definirana je kao certificirana vrijednost KV_R . Standardna devijacija kod ispitivanja homogenosti računa se prema normi HRN EN ISO 148-3 te treba poštovati zahtjeve dane u tablici 6, gdje je KV_R certificirana vrijednost referentnog materijala [19].

Tablica 6. Vrijednosti standardne devijacije [19]

Energija KV_R	Standardna devijacija
$< 40 \text{ J}$	$\geq 2.0 \text{ J}$
$\geq 40 \text{ J}$	$\geq 5 \% KV_R$

Kako bi se izbjegao utjecaj uređaja na referentnu vrijednost, poželjno je izvesti testove na više uređaja. Prema međunarodnoj normi potrebno je barem šest laboratorija. Što veći broj uređaja sudjeluje u ispitivanju, to je veća mogućnost da dobivene vrijednosti budu točnije te objektivnije. Potrebno je da su svi uređaji na kojima se vrši ispitivanje vrlo visoke kvalitete, te da laboratoriji zadovoljavaju minimalne zahtjeve kvalitete, sukladno međunarodnoj normi [19].

3.2 Indirektna provjera Charpy-evog bata upotrebom referentnih uzoraka

Indirektna provjera industrijskog uređaja provodi se korištenjem kompleta od pet uzoraka te se uzimaju srednje vrijednosti ispitivanja. Indirektna provjera trebala bi se izvoditi svakih 12 mjeseci. Zamjena ispitnog uzorka sa uzorkom iz drugog referentnog kompleta nije dopuštena.

Referentni uzorci korišteni su [19]:

- Za usporedbu između rezultata ispitivanja dobivenih na ispitnom uređaju te referentnih vrijednosti definiranih normom HRN EN ISO 148-3,
- Za kontrolu mjerne sposobnosti uređaja tokom vremena

Indirektna provjera mora biti provedena na minimalno dvije razine energije unutar nazivne vrijednosti ispitnog uređaja. Razina apsorbirane energije referentnih uzoraka mora biti što je bliže moguće najnižoj te najvišoj vrijednosti raspona korištenja. Kada se provjera provodi na više od dvije razine energije, sljedeće razine moraju biti izabrane između gornjih i donjih granica, ovisno o granicama referentnih uzoraka. Indirektna provjera radi se kod instalacije uređaja, poslije preseljenja uređaja ili zamjene dijelova [19].

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada su provedena ispitivanja u cilju provjere pokazivanja točnosti instrumentiranog Charpy-evog bata. U normi su definirane vrste provjera direktno i indirektno. No pored toga, za potrebe ovog rada napravljena su ispitivanja udarnog rada loma na standardnim epruvetama izrađenim od jednog čelika te je također provedeno statičko vlačno ispitivanje na epruvetama izrađenima od istog čelika S275J0G3.

Svrha ovog ispitivanja je bila da li je i u kojoj mjeri moguće povezati rezultate iz statičkog vlačnog ispitivanja i vrijednosti dobivenih iz krivulja kod instrumentirane metode ispitivanja udarnog rada loma.

Faze provedbe eksperimenta:

- provjera Charpy-evog bata direktnom i indirektnom metodom,
- izrada 31 epruvete od istog materijala za ispitivanje udarnog rada loma,
- izrada 5 epruveta za statičko vlačno ispitivanje,
- provedba mjerenja udarnog rada loma i sila instrumentiranom metodom,
- provedba statičkog vlačnog ispitivanja.

4.1 Provjera instrumentiranog Charpy-evog bata

Ispitivanje instrumentiranog Charpy-evog bata provedeno je u svrhu utvrđivanja točnosti te umjeravanja uređaja. Korišten je instrumentirani Charpy-ev bat sljedećih osnovnih podataka (slika 35).

Osnovni podaci instrumentiranog Charpy-evog bata:

- proizvođač-ZWICK/ROELL,
- tip: RKP 450,
- mjerno područje uređaja: 0-450 J,
- zemlja porijekla: Njemačka,
- godina proizvodnje: 2013.



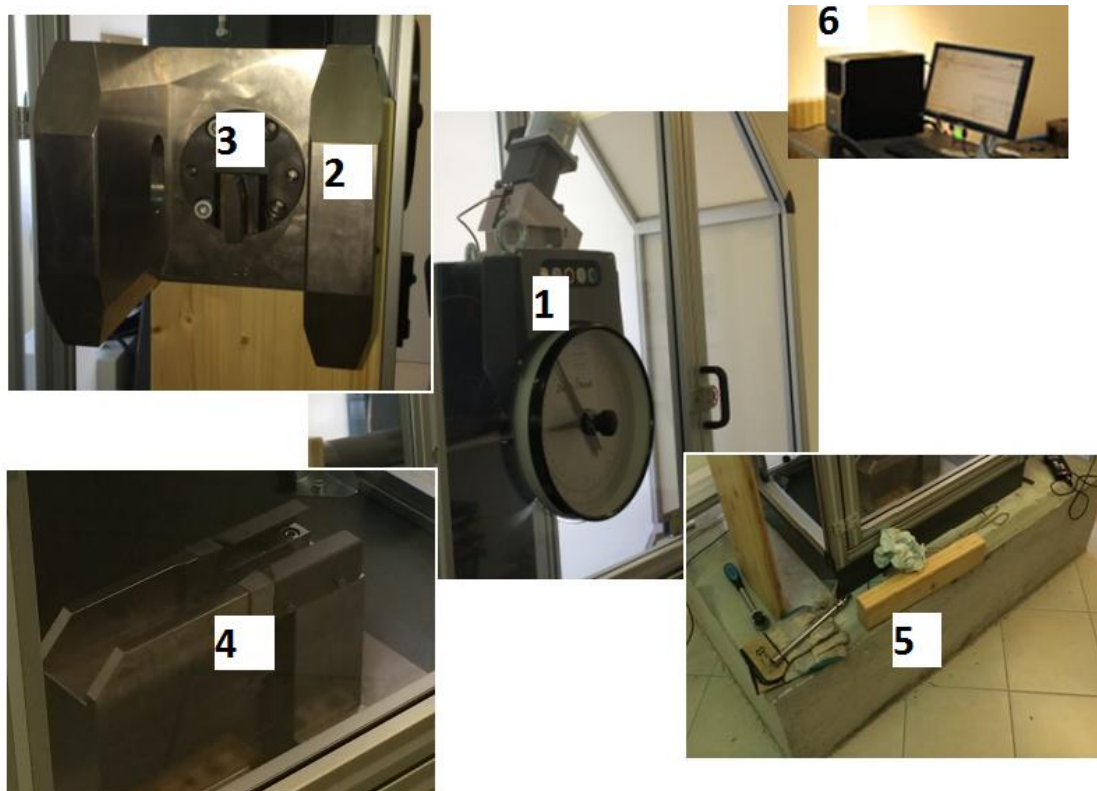
Slika 35. Instrumentirani Charpy-ev bat, ZWICK/ROELL, RPK 450

Očitanje uređaja vrši se preko analogne kružne skale rezolucije 1 J, digitalnog pokazivača rezolucije 0,1 J te digitalno očitavanje na računalo rezolucije 0,01 J. Računalo koristi softver testXpert 2. Uređaj je pričvršćen na betonski temelj sukladno normi HRN EN ISO 148-2.

Dijelovi instrumentiranog Charpy-evog bata su:

1. Analogna kružna skala,
2. Njihalno tipa „U”,
3. Nož,
4. Oslonci epruveta,
5. Betonski temelj,
6. Računalo s softverskim paketom.

Dijelovi instrumentiranog Charpy-evog bata prikazani su na slici 36.



Slika 36. Dijelovi Charpy-evog bata

Tip njihala uređaja je u obliku slova „U”. Nož bata radijusa je 2 mm, širine 12,1 mm te dužine 15,5 mm. Radijus oslonaca je 1 mm, razmak između oslonaca je 40,02 mm te ukupna visina oslonaca 41,6 mm. Kut noža bata je 30° . Sve ove vrijednosti su u granicama propisanim normom. Prikaz noža dan je na slici 37.



Slika 37. Geometrija noža bata

Postupak ispitivanja proveden je indirektnim mjerenjem pomoću referentnih uzoraka, sukladno normi EN ISO 148-2:2009. Ispitivanje je provedeno na temperaturi od 20°C.

Uzorci su kupljeni od instituta IfEP (Institut für Eignungsprüfung). To je njemački nezavisni institut koji je akreditiran za proizvodnju referentnih uzoraka.

Korištena su dva kompleta referentnih uzoraka. Svaki komplet sastoji se od pet referentnih epruveta. Epruvete su standardnih dimenzija 55×10×10 mm s V-zarezom dubine 2 mm napravljenim pod kutom od $45^{\circ} \pm 2^{\circ}$. Jedan komplet referentnih epruveta je nazivne vrijednosti 70 J, oznake IfEP-K-042/143, a drugi komplet je nazivne vrijednosti 120 J, oznake IfEP-K-055/018. Na slici 38 dan je certifikat sa kompletom uzoraka nazivne vrijednosti 70 J, a na slici 39 certifikat sa kompletom uzoraka nazivne vrijednosti 120 J.



Slika 38. Certifikat sa referentnim uzorcima (70 J)



Slika 39. Certifikat sa referentnim uzorcima (120 J)

Prije ispitivanja bilo je potrebno skinuti standardni nož sa njihala te ga zamijeniti instrumentiranim nožem. Instrumentirani nož na sebi ima ugrađene tenzometre za mjerenje opterećenja. Prikaz instrumentiranog noža dan je na slici 40.



Slika 40. Instrumentirani nož

Nakon izmjene noža moglo se započeti sa ispitivanjem. Prvo se ispitivalo sa referentnim uzorcima nazivne vrijednosti (KV_{ref}) 70 J, a zatim sa referentnim epruvetama nazivne vrijednosti 120 J.

Ispitivanje započinje podizanjem bata u početni položaj te njegovim fiksiranjem u tom položaju. Potom se između oslonaca stavlja epruveta pomoću hvataljki te se centrira pomoću naprave za centriranje koja je u obliku igle te se nalazi na samom uređaju. Zarez na uzorku se mora podudarati sa iglom. Na slikama 41 i 42 dan je prikaz hvataljki te centriranja uzorka.



Slika 41. Hvataljke



Slika 42. Centriranje uzorka

Mjerenje se provodilo sukladno postupku opisanom u poglavlju 2.2.4 ovog rada.

Prikaz rezultata dan je u tablicama. U tablici 7 dani su rezultati ispitivanja za epruvete referentne vrijednosti 70 J, a u tablici 8 rezultati ispitivanja za epruvete referentne vrijednosti 120 J.

Tablica 7. Prikaz rezultata (70 J)

KV_{ref} , J	Redni br. mjerjenja	KV_i J	KV_{sr} J	q		b	
				J	%	J	%
70	1	69,56	69,64	-0,36	-0,5	2,11	3,0
	2	70,68					
	3	68,57					
	4	70,01					
	5	69,37					

Tablica 8. Prikaz rezultata (120 J)

KV_{ref} , J	Redni br. mjerjenja	KV_i J	KV_{sr} J	q		b	
				J	%	J	%
120	1	118,75	121,68	1,68	1,4	6,10	5,1
	2	121,44					
	3	124,85					
	4	120,65					
	5	122,72					

4.2 Ispitivanje udarnog rada loma instrumentiranom metodom

Ispitivanje udarnog rada loma instrumentiranom metodom provedeno je na ispitnom uređaju ZWICK/ROELL RKP 450 u institutu METRIS u Puli. Opis uređaja dan je u poglavlju 4.1. Ispitivanje je sukladno normi HRN EN ISO 14556:2000.

Ispitivanje se provelo na 31. ispitnom uzorku. Uzorci su izrađeni od čelika, standardnih dimenzija 55x10x10 mm sa V-zarezom dubine 2 mm, napravljenim pod kutem $45^\circ \pm 2^\circ$. Kako su dimenzije uzoraka propisane normom, te definirane u tablici 1, na svakoj epruveti pomičnim mjerilom izmjerene su tri karakteristične dimenzija: dužina, širina i visina te kut sa prednje i stražnje strane zareza. Rezultati mjerenja nalaze se u tablici 8.

Tablica 8. Dimenzije uzoraka

Red. br.	<i>h</i> , mm	<i>w</i> , mm	<i>l</i> , mm	Kut (prednja strana)	Kut (stražnja strana)
1	9.99	9.95	55.06	46.53°	46.86°
2	10.03	9.98	55.26	46.30°	46.16°
3	10.04	10.02	55.29	46.42°	45.82°
4	9.99	9.96	55.20	47.40°	47.51°
5	10.02	9.98	55.01	46.55°	46.40°
6	9.98	9.98	55.05	46.06°	46.82°
7	9.96	9.97	55.15	46.44°	46.84°
8	9.94	9.95	54.90	46.36°	46.80°
9	9.99	9.95	55.05	47.10°	47.26°
10	9.97	10	55.30	45.02°	45.67°
11	10.01	9.97	55.10	46.14°	46.22°
12	10.01	10.01	55.20	46.64°	47.03°
13	10	9.99	55.16	46.06°	46.75°
14	10	9.99	55.15	46.49°	46.68°
15	10	9.98	55.30	45.16°	45.97°
16	10	9.96	55.22	46.86°	46.80°
17	10	10.05	55.33	46.64°	46.31°
18	10.02	10.02	55.80	46.34°	46.56°
19	10.03	9.95	55.20	47.79°	47.52°
20	9.97	10.01	55.20	47.12°	46.79°
21	9.98	9.98	55.20	47.04°	47.60°
22	10.03	9.96	55.10	46.32°	46.57°
23	10.01	9.99	55.08	46.55°	46.80°
24	9.99	9.98	55.27	46.56°	46.99°
25	10.01	9.93	55.24	47.56°	46.93°
26	10	9.95	55.19	46.56°	46.09°
27	10.03	10.05	55.09	46.16°	45.28°

28	10	9.97	55.14	47.23°	47.55°
29	10.01	10	55.08	46.38°	47.30°
30	9.98	9.97	55.19	46.44°	47.10°
31	9.95	10	54.90	46.26°	46.86°

Prije samog ispitivanja uzorke je potrebno označiti kako se prilikom ispitivanja i daljnjeg rukovanja ne bi pomiješali. Stoga je svaki uzorak sa flomasterom označen rednim brojevima od 1-31. Nakon označavanja uzoraka moglo se započeti sa ispitivanjem.

Nakon centriranja uzorka, bat se otpušta i udara u epruvetu suprotno od zareza. Brzina udara bata je 5,234 m/s. Uzorak se pri udarcu bata potpuno ili djelomično slomi. Postupak se ponavlja dok se svi uzorci ne slome. Prilikom ispitivanja niti jedan uzorak nije potpuno slomljen. Prikaz slomljenih uzoraka dan je na slici 43.



Slika 43. Prikaz slomljenih uzoraka

Prilikom ispitivanja svakog uzorka radi se očitavanje na analognoj mjernoj skali, gdje se očitava udarni rad loma. Također, detaljni rezultati ispitivanja sa svim silama, pomacima te energijama zabilježe se na računalu povezanom sa Charpy-evim batom. Rezultati udarnog rada loma dani su u tablici 9.

Tablica 9. Rezultati udarnog rada loma

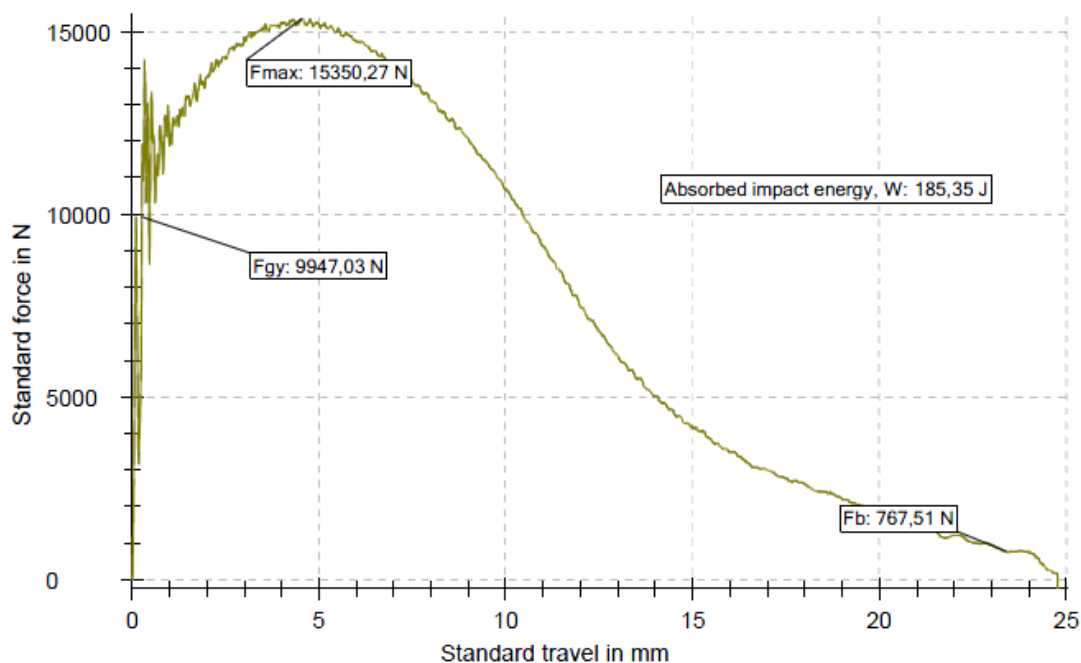
Redni broj	W, J	Redni broj	W, J
1	170,30	17	161,04
2	159,11	18	188,83
3	185,35	19	174,50
4	185,50	20	187,01
5	168,35	21	162,38
6	163,28	22	160,30
7	171,35	23	164,47
8	186,71	24	162,38
9	189,58	25	159,55
10	156,14	26	162,08
11	187,92	27	184,44
12	160,00	28	165,81
13	161,79	29	165,07
14	155,84	30	158,51
15	158,66	31	172,40
16	157,03	-	-

Prikaz rezultata svih sila i pomaka dan je u tablici 10.

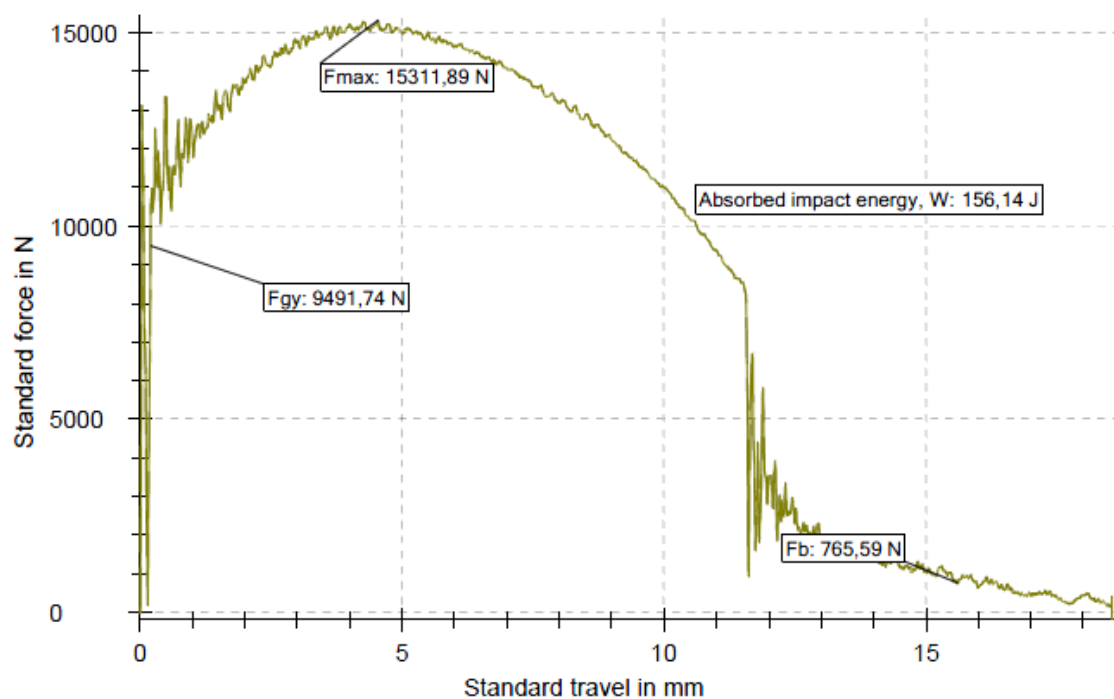
Tablica 10. Rezultati ispitivanja sila i pomaka instrumentiranom metodom

Redni broj	S_m , mm	F_b , N	F_{gy} , N	F_{max} , N
1	4,28	765,24	8763,45	15304,72
2	4,75	769,00	9936,09	15379,92
3	4,54	767,51	9947,03	15350,87
4	4,73	765,29	10030,71	15305,87
5	4,75	778,20	9963,41	15563,96
6	4,54	774,09	9488,98	15481,85
7	4,54	764,14	9320,07	15282,86
8	4,56	766,70	9628,24	15333,98
9	4,28	772,86	9429,08	15457,28
10	4,54	765,59	9491,74	15311,89
11	4,75	768,28	9641,53	15365,67
12	4,52	770,17	9815,59	15403,40
13	4,75	767,11	10005,68	15342,17
14	4,28	768,13	9198,25	15362,55
15	4,73	771,57	10024,70	15431,39
16	4,28	770,34	9298,08	15406,86
17	4,56	767,82	9806,31	15356,33
18	4,58	774,36	9607,45	15487,24
19	4,34	771,54	9664,25	15430,77
20	4,30	775,82	10313,58	15516,42
21	4,75	768,77	10067,62	15375,42
22	4,30	776,00	9377,52	15519,95
23	4,75	777,21	9817,77	15544,17
24	4,54	772,32	9984,49	15446,48
25	4,56	771,48	9486,11	15429,65
26	4,75	770,62	9837,38	15412,36
27	4,34	768,78	9681,79	15375,68
28	4,28	774,30	9422,97	15485,98
29	4,54	771,04	9483,89	15420,77
30	4,56	773,07	8957,35	15461,39
31	4,28	772,59	8999,19	15451,72

Uz rezultate mjerenja dani su i dijagrami sa iscrtanim krivuljama za svaki ispitanii uzorak. Na dijagramima su također prikazane sile te energije. Neki od dijagrama ispitivanja dani su na slikama 44 i 45.



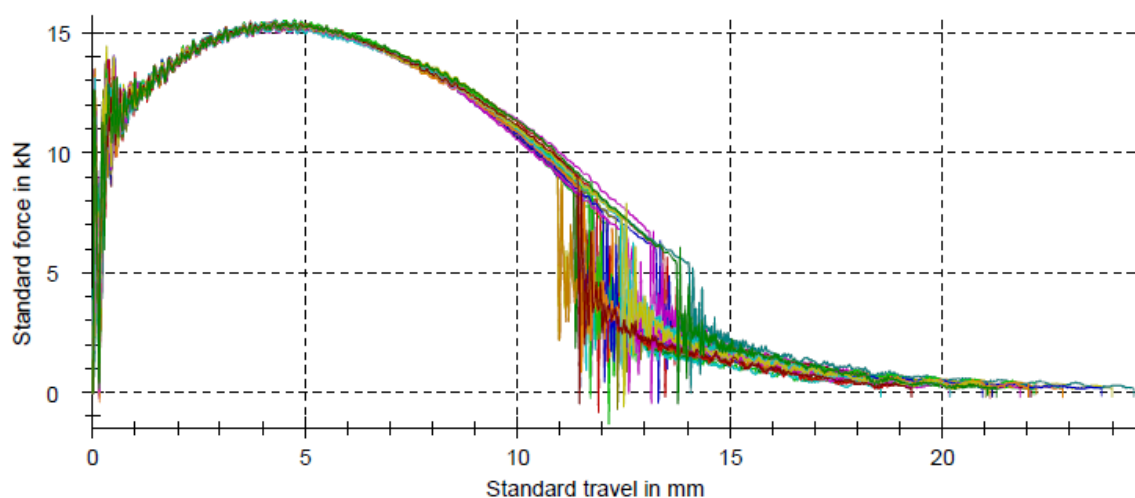
Slika 44. Dijagram uzorka 3



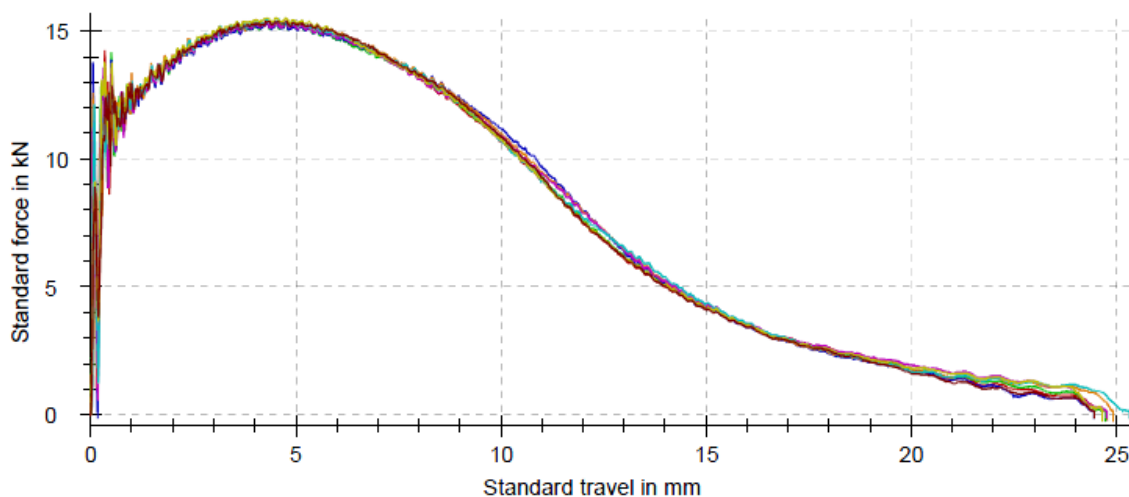
Slika 45. Dijagram uzorka 10

Na temelju dobivenih dijagrama radi se usporedba krivulja dobivenih iz ispitivanja uzoraka sa tipovima krivulja danih na slici 2, u svrhu pojednostavljenja procjene i izvještaja.

Ispitani uzorci dali su krivulje tipa E i F. Kod tipa krivulje E pojavljuje se u približno jednakom omjeru stabilno i nestabilno širenje pukotine, dok se kod tipa krivulje F pojavljuje samo stabilno širenje pukotine. Dvadeset i tri uzorka dala su tip krivulje E, a preostalih osam dalo je tip krivulje F. Tipovi krivulja E i F ispitanih uzoraka dani su na slikama 46 i 47.



Slika 46. Uzorci krivulje E



Slika 47. Uzorci krivulje F

4.3 Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za mehanička ispitivanja materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno na kidalici HECKERT (slika 48). Ovim ispitivanjem utvrđuju se osnovna mehanička svojstva materijala a to su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, istežljivost, kontrakcija.

Karakteristike kidalice:

- proizvođač: Heckert
- tip: WPM EU 40 MOD
- način opterećivanja: hidraulički
- klasa točnosti: 0,5 (sukladno normi HRN EN ISO 7500-1)



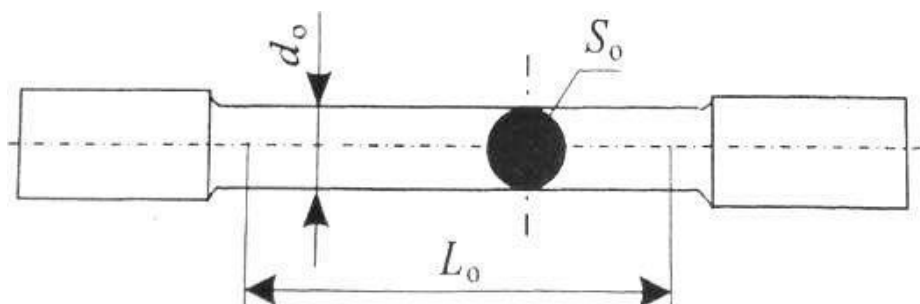
Slika 48. Kidalica HECKERT

Ispitivanje je provedeno na pet epruveta okruglog poprečnog presjeka izrađenih od istog čelika kao i epruvete za udarni rad loma. Prikaz epruveta dan je na slici 49.



Slika 49. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje

Prije ispitivanja potrebno je izmjeriti promjer (d_0) vrata svake epruvete na tri mjesta te uzeti srednju vrijednost te odrediti duljinu L_0 . Kod epruveta okruglog poprečnog presjeka početna duljina L_0 treba biti jednaka peterostrukom početnom promjeru d_0 i stoga ona kod ovih ispitnih epruveta iznosi 30 mm te se na svakoj epruveti označi duljina L_0 . Prikaz crteža epruvete sa kotama dan je na slici 50.



Slika 50. Epruveta sa danim kotama

Mjere epruveta dane su u tablici 11.

Tablica 11. Mjere epruveta

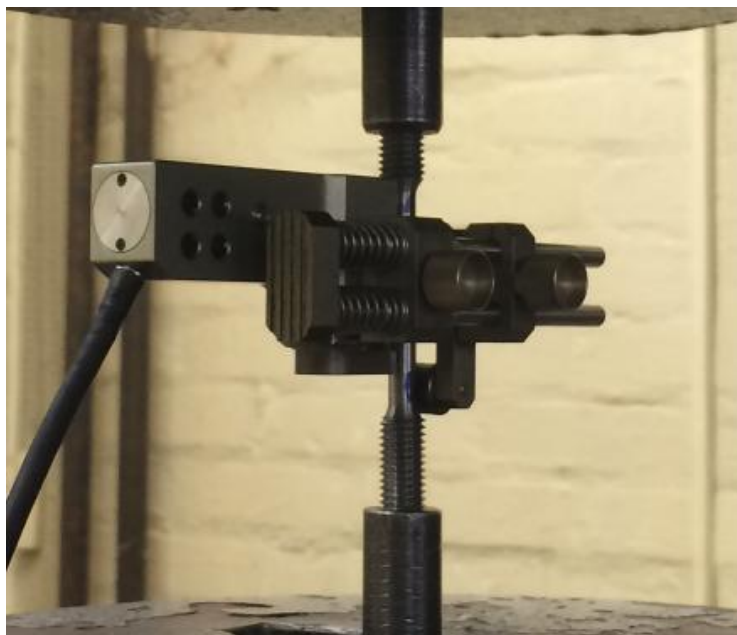
Oznaka epruvete	d_0 , mm	S_0 , mm	L_0 , mm
1	6,00	28,27	30,00
2	6,02	28,46	30,00
3	6,02	28,46	30,00
4	6,00	28,27	30,00
5	6,00	28,27	30,00

Nakon mjerenja epruveta može se započeti sa ispitivanjem. Temperatura ispitivanja iznosila je 22,8°C, a brzina ispitivanja je iznosila 40 N/s. Epruveta se na mjestima zadebljanja („glava“ epruvete) učvršćuje u čeljusti kidalice. Prikaz učvršćivanja epruvete prikazan je na slici 51.



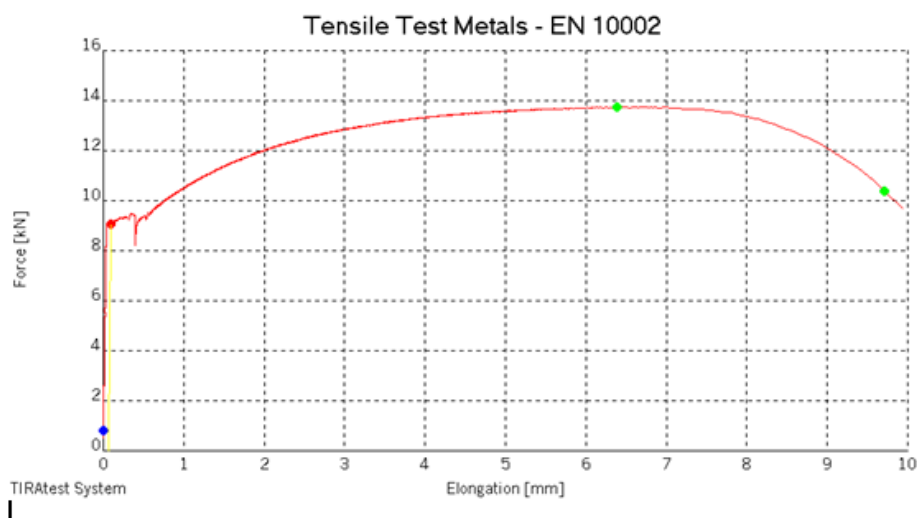
Slika 51. Učvršćivanje epruvete

Kidalica je opremljena sa dva ekstenziometra. Jedan je na samom stroju, a drugi se učvršćuje na epruvetu. Ekstenziometri služe za preciznije mjerenje produljenja. Prikaz ekstenziometra na epruveti dan je na slici 52.



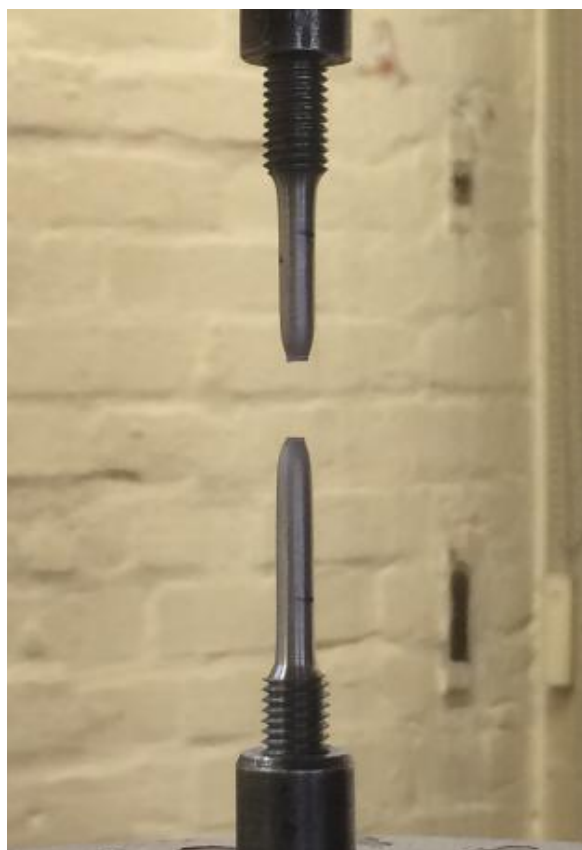
Slika 52. Prikaz ekstenziometra

Kidalica je povezana sa računalom te se za vrijeme ispitivanja preko softvera crta dijagram „sila-produljenje“. Prikaz dijagrama za uzorak 1 dobivenog prilikom ispitivanja dan je na slici 53. Ostali dijagrami nalaze se u prilogu.



Slika 53. Dijagram $F-A_L$ za uzorak 1

Prikaz loma epruvete dan je na slici 54.



Slika 54. Lom epruvete

Kod svih epruveta lom se dogodio u srednjoj trećini (slika 55).



Slika 55. Prikaz lomova svih epruveta

Nakon ispitivanja na računalu su iscrtane sve krivulje te su dani svi rezultati ispitivanja. Prikaz rezultata ispitivanja dan je u tablici 12.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja

Ep. Br.	F_m kN	F_k kN	F_{eH} kN	L_u mm	d_u mm	R_m N/mm ²	R_k N/mm ²	R_{eH} N/mm ²	S_u mm	A %	Z %
1	13,74	10,25	9,37	40,22	3,33	485,9	362,6	331,4	8,71	34,1	69,2
2	13,84	10,40	9,57	41,10	3,21	486,1	365,4	336,15	8,09	37,0	71,6
3	13,82	10,10	9,50	41,08	3,20	485,4	354,8	333,9	8,04	36,9	71,7
4	13,64	10,05	9,47	40,5	3,20	482,5	355,5	335,17	8,04	35,0	71,6
5	13,56	9,87	9,32	40,95	3,20	479,7	349,1	329,8	8,04	36,4	71,6

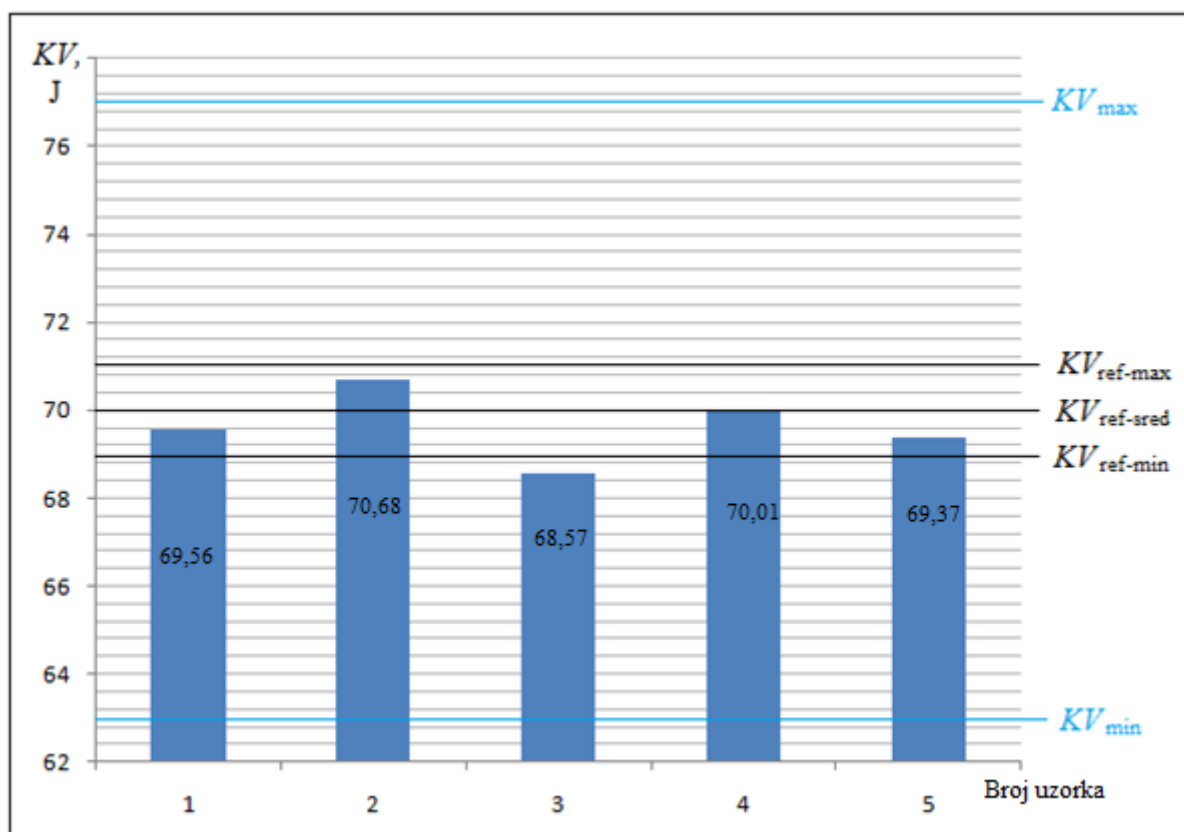
5. ANALIZA REZULTATA

5.1 Analiza rezultata umjeravanja

Na temelju provedenih mjerenja u cilju određivanja točnosti pokazivanja instrumentiranog Charpy-evog bata utvrđene su sljedeće činjenice. Direktnom metodom utvrđeno je da su svi provjereni dijelovi instrumentiranog Charpy-evog bata u granicama sukladno normi HRN EN ISO 148-2.

Indirektna metoda provjere je provedena certificiranim referentnim epruvetama i pokazala je da Charpy-ev bat ima visoku razinu točnosti.

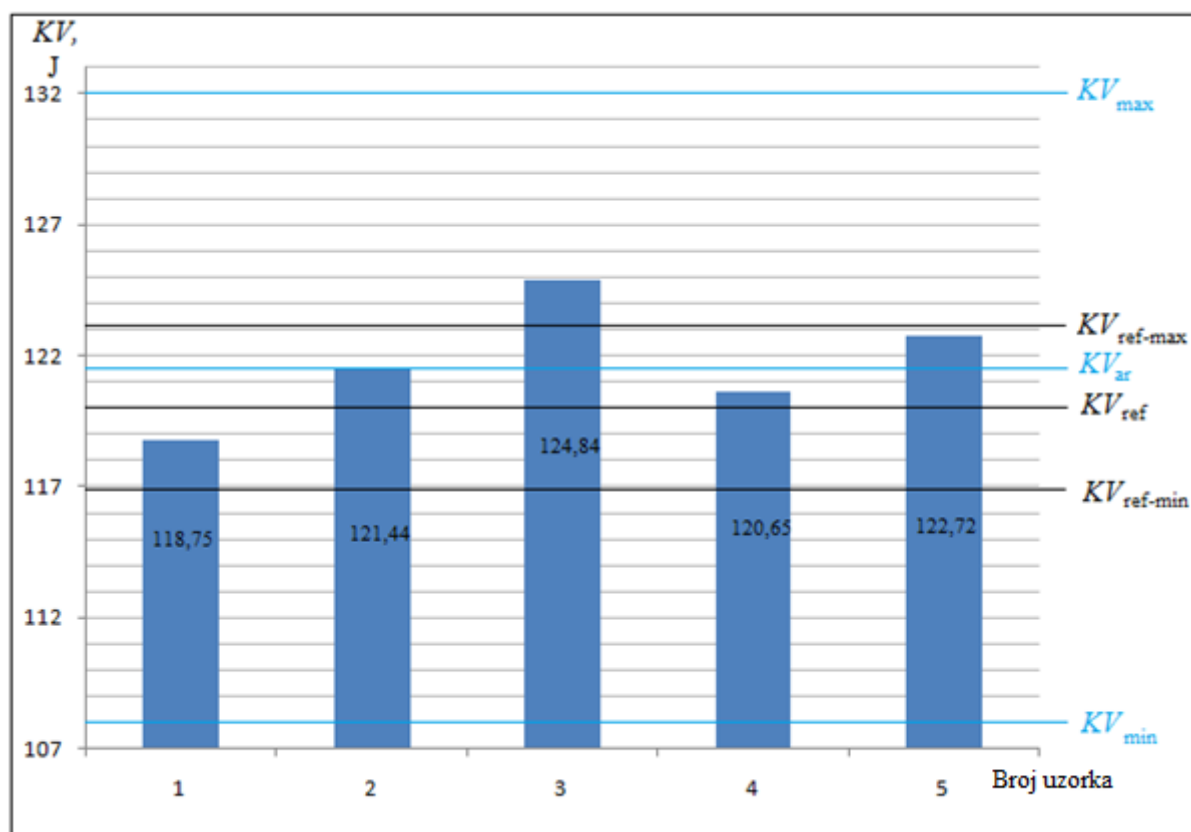
Slika 56 pokazuje dijagram apsorbiranih energija referentnih uzoraka referentne vrijednosti $70 \pm 1,1$ J. Sukladno normi HRN EN ISO 148-2 dozvoljeno odstupanje vrijednosti indirektnom metodom za vrijednosti ≥ 40 J iznosi $\leq 10\% KV_{ref}$ (u ovom slučaju ± 7 J).



Slika 56. Dijagram udarnog rada loma referentnih uzoraka (70 J)

Dijagram pokazuje kako se svi uzorci blisko nalaze u tolerancijskom polju samih referentnih epruveta. Aritmetička sredina svih ispitanih uzoraka iznosi 69,64 J što je odstupanje od 0,36 J ili 0,5 %.

Slika 57 pokazuje dijagram apsorbiranih energija referentnih uzoraka referentne vrijednosti $120 \pm 3,1$ J. Sukladno normi HRN EN ISO 148-2 dozvoljeno odstupanje vrijednosti indirektnom metodom za vrijednosti ≥ 40 J iznosi $\leq 10\% KV_{ref}$ (u ovom slučaju ± 12 J).



Slika 57. Dijagram udarnog rada loma referentnih uzoraka (120 J)

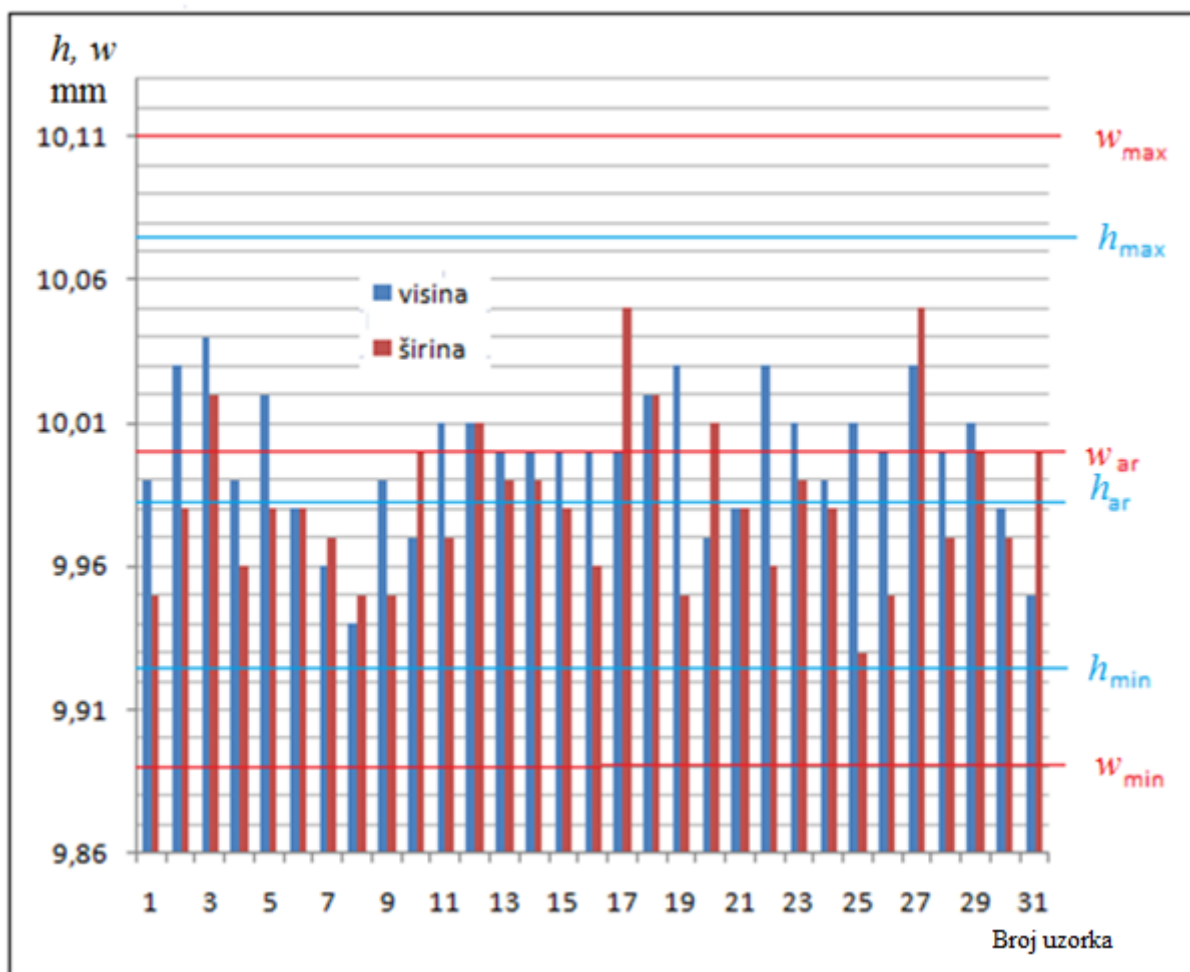
Dijagram pokazuje kako se svi uzorci blisko nalaze u tolerancijskom polju samih referentnih epruveta. Aritmetička sredina svih ispitanih uzoraka iznosi 121,68 J što je odstupanje od 1,68 J ili 1,4 %.

Iz ovih umjeravanja indirektnom metodom može se zaključiti da je Charpy-ev bat vrlo dobrih karakteristika s obzirom da su dozvoljena odstupanja manja od 10 % KV_{ref} za nazivne vrijednosti ≥ 40 J (sukladno normi HRN EN ISO 148-2).

5.2 Analiza ispitivanja uzoraka instrumentiranom Charpy-evom metodom

Prije analize rezultata ispitivanja provedena je analiza vrijednosti dimenzija ispitnih uzoraka (dužina, širina, visina i kut V-zareza).

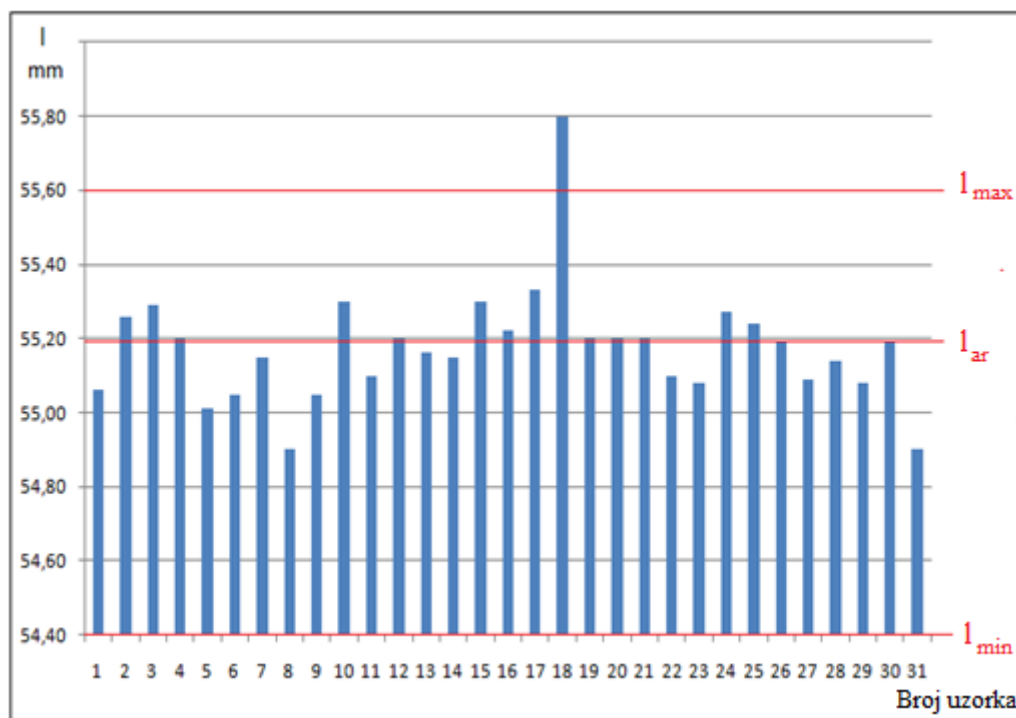
Slika 58 pokazuje dijagramski prikaz visine i širine ispitnih uzoraka.



Slika 58. Dijagramski prikaz vrijednosti visine i širine ispitnih uzoraka

Analizom je utvrđeno da aritmetička sredina visine uzoraka iznosi 9,98 mm i ulazi u tolerancijsko polje $10 \pm 0,11$ mm. Aritmetička sredina širine uzoraka iznosi 9,99 mm i također ulazi u tolerancijsko polje $10 \pm 0,75$ mm propisano normom.

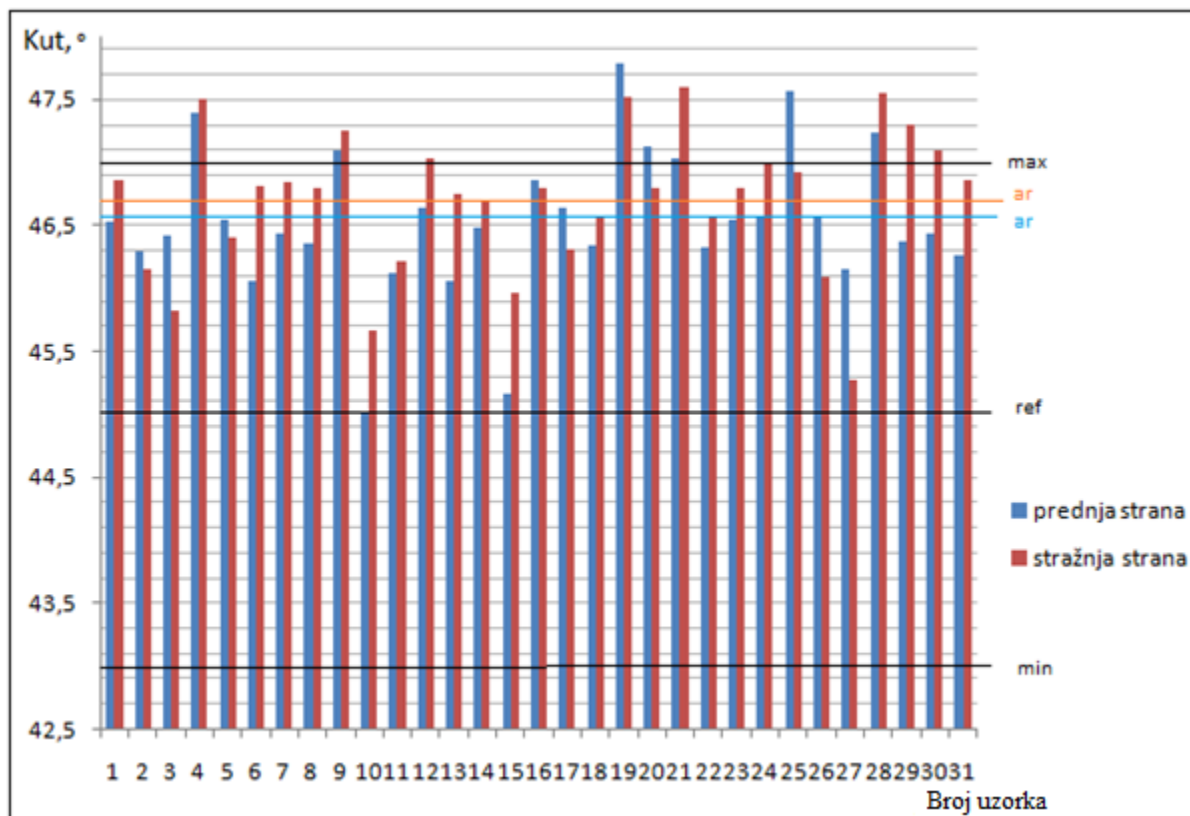
Slika 59 prikazuje dijagramski prikaz dužine ispitnih uzoraka.



Slika 59. Dijagramski prikaz vrijednosti dužine ispitnih uzoraka

Analizom je utvrđeno da svi uzorci osim jednog ulaze u tolerancijsko polje $55 \pm 0,60$ mm te aritmetička sredina uzoraka iznosi 55,17 mm.

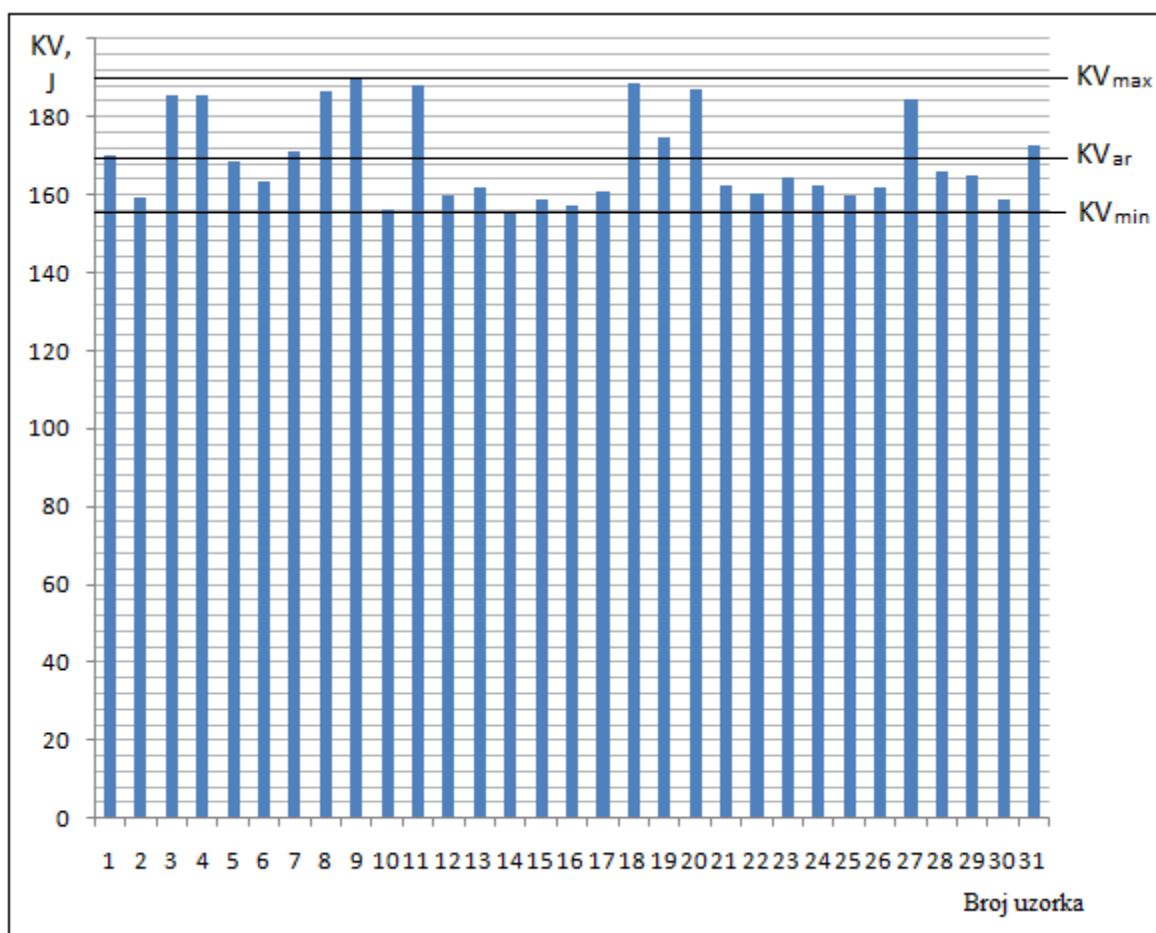
Slika 60 prikazuje dijagramski prikaz vrijednosti kuteva ispitnih uzoraka.



Slika 60. Dijagramski prikaz vrijednosti kuteva ispitnih uzoraka

Analizom je utvrđeno da neki od uzoraka ne zadovoljavaju tolerancijsko polje $45^\circ \pm 2^\circ$ jer kut nije u potpunosti korektno izrađen. Naknadnim pregledom utvrđeno je da je razlog tome bilo oštećenje glodala.

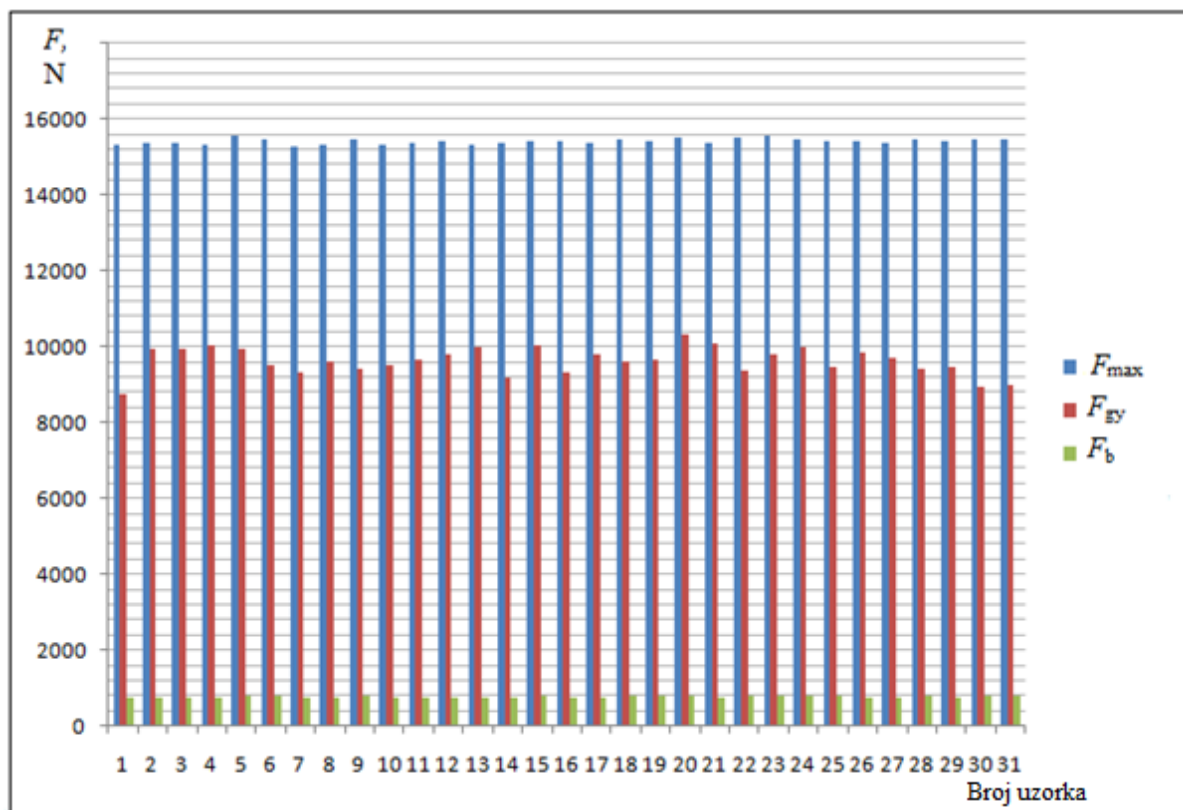
Analiza rezultata ispitivanja udarnog rada loma na čeliku S275J0G3 provedena je na temelju dobivenih rezultata ispitivanja. Slika 61 prikazuje dijagram udarnog rada loma slomljenih uzoraka. Analizom je utvrđeno da je maksimalna vrijednost udarnog rada loma 189,58 J, minimalna vrijednost 155,84 J. Aritmetička sredina od 31 ispitnog uzorka je 169,21 J, a standardno odstupanje 11,56 J.



Slika 61. Dijagram udarnog rada loma

Rasipanje rezultata je dosta veliko što se djelomično može pripisati i neadekvatnoj izvedbi kuta V-zareza.

Slika 62 prikazuje dijagramski prikaz vrijednosti sila dobivenih iz ispitivanja instrumentiranim Charpy-evim batom.



Slika 62. Vrijednosti sila dobivenih instrumentiranom metodom

Prema dijagramu na slici 62 dane su srednje vrijednosti sila u tablici 13.

Tablica 13. Srednje vrijednosti sila

	F_{gy} kN	F_m kN	F_k kN
Aritmetička sredina	9,62	15,41	0,77
Standardna devijacija	0,361	0,073	0,3,68

5.3 Analiza statičkog vlačnog ispitivanja

Zbog usporedbe sa silama iz ispitivanja instrumentiranim Charpy-evim batom napravljena je analiza rezultata statičkog vlačnog ispitivanja.

Srednje vrijednosti rezultata dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem dane su u tablici 14.

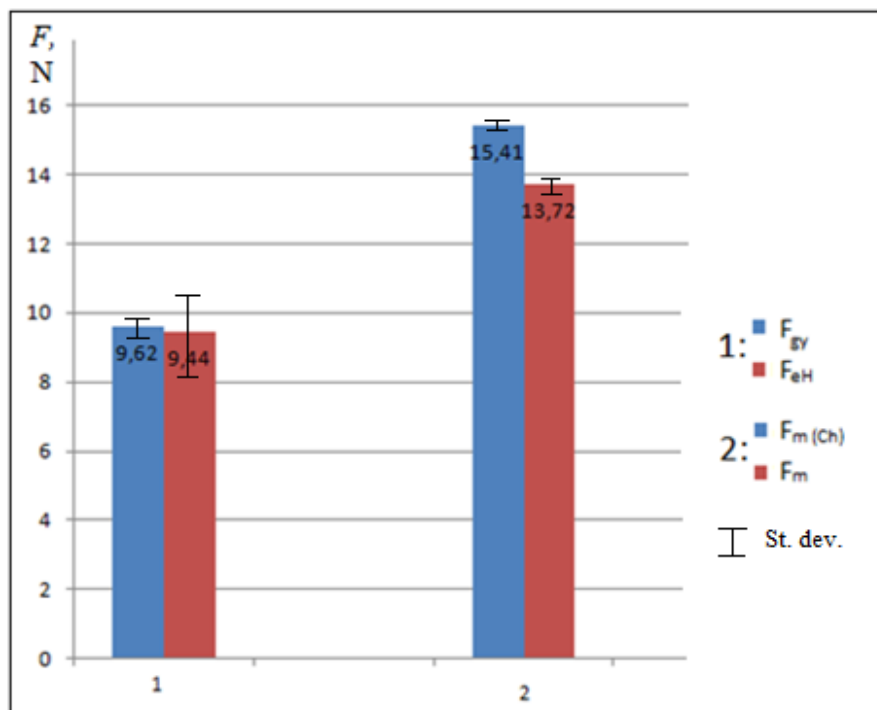
Tablica 14. Srednje vrijednosti rezultata statičkog vlačnog ispitivanja

	F_m kN	F_k kN	F_{eH} kN	R_m N/mm ²	R_k N/mm ²	R_{eH} N/mm ²	A %	Z %
Aritmetička sredina	13,72	10,13	9,44	483,92	357,48	331,16	35,88	71,14
Standardna devijacija	0,11	0,20	2,75	2,78	6,50	2,63	1,28	1,08

Podaci odgovaraju specifikacijama tog čelika iz literature.

5.4 Analiza usporedbe sila

Na temelju rezultata ispitivanja, na slici 63 dana je usporedba srednjih vrijednosti sila iz ispitivanja instrumentiranom metodom te statičkim vlačnim ispitivanjem.



Slika 63. Usporedba rezultata sila

Iz dijagrama je vidljivo da se vrijednosti sila za granicu razvlačenja (sila tečenja) dobivenih iz statičkog vlačnog ispitivanja poklapaju sa vrijednostima iz instrumentirane metode. Također se vidi da je maksimalna sila iz ispitivanja instrumentiranom metodom približno ista kao i maksimalna sila iz statičkog vlačnog ispitivanja. Sila F_b ne odgovara sili F_k . Sila F_{iu} odgovara sili F_k no zbog toga što je dio epruveta pokazao tip krivulje F nije moguće očitati silu F_{iu} te ona nije uzeta u obzir.

6. ZAKLJUČAK

Kao što znamo, ispitivanje Charpy-evim batom je standardizirana metoda kojom se određuje količina apsorbirane energije u materijalu prilikom loma. Vrlo je primjenjiva u industriji, zbog lake pripreme uzoraka te vrlo brzog i jeftinog dobivanja rezultata ispitivanja. Međutim, glavni nedostatak je taj što su rezultati samo komparativnog karaktera. Primjenom instrumentirane metode za ispitivanje udarnog rada loma Charpy-evim batom osim rezultata udarnog rada loma moguće je dobiti još bitnih podataka o materijalu.

Iz provedenih eksperimentalnih istraživanja te dobivenih rezultata mogu se donijeti sljedeći zaključci:

1. Primjena certificiranih referentnih materijala pri umjeravanju Charpy-evih batova pokazuje pravo stanje pokazivanja Charpy-evog bata. Na temelju indirektnog umjeravanja pokazano je da su odstupanja pokazivanja bata znatno manja od dozvoljenih odstupanja sukladno normi HRN EN ISO 148-2.
2. Kvaliteta izrade ispitnih uzoraka ima veliki utjecaj na rezultate ispitivanja udarnog rada loma. Posebno veliki značaj ima kut V-zareza. Uslijed većih odstupanja kuta od $45^\circ \pm 2^\circ$, veća su rasipanja rezultata ispitivanja udarnog rada loma.
3. Na temelju dijagrama „sila-pomak“ instrumentirane metode ispitivanja udarnog rada loma Charpy-evim batom moguće je dobiti određene sile koje su karakteristične za statičko vlačno ispitivanje. Na temelju ispitivanja na čeliku S275J0G3 pokazano je:
 - Sile razvlačenja F_{gy} iz instrumentirane metode se poklapaju s vrijednostima sila F_{eH} ,
 - Maksimalne sile F_m kod instrumentirane metode i statičkog vlačnog ispitivanja razlikuju se za 10%,
 - Određivanje sile na kraju nestabilnog loma i sile pri početku nastajanja pukotine je problematično jer ovise o tipu krivulje kod instrumentirane metode te ih nije u ovom slučaju bilo moguće povezati s vrijednostima iz statičkog vlačnog ispitivanja.

Ova eksperimentalna istraživanja su pokazala da primjena instrumentirane metode pruža puno veće mogućnosti u karakterizaciji materijala u odnosu na klasičnu metodu određivanja udarnog rada loma Charpy-evim batom. Sva ova ispitivanja su rađena samo na čeliku S275J0G3. Isto ovo bi trebalo napraviti i za druge čelike ali i druge metalne materijale.

LITERATURA

- [1] Tomislav Filetin; Izbor materijala pri razvoju proizvoda, FSB, Zagreb, 2000
- [2] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Krhkost> (dostupno 29.3 2015.)
- [3] Mladen Franz; Mehanička svojstva materijala, FSB, 1998
- [4] Marc Meyers and Kristian Chawla; Mechanical behavior of materials, Cambridge University press, New York, 2009
- [5] [http://www.scribd.com/doc/74594999/Ispitivanje-Udarne-Radnje Loma](http://www.scribd.com/doc/74594999/Ispitivanje-Udarne-Radnje-Loma) (dostupno 25.3.2015)
- [6] Vinko Ivušić, Mladen Franz, Đurđica Španiček, Lidija Ćurković; Materijali I, FSB, Zagreb, 2011
- [7] http://hr.wikipedia.org/wiki/Charpyjevo_klatno (dostupno 22.4.2015)
- [8] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mechanical-testing-notched-bar-or-impact-testing-071/> (dostupno 15.4.2015)
- [9] International standard ISO 148-1:2009, Metallic materials- Charpy pendulum impact test
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Izod_impact_strength_test (dostupno 28.4.2015)
- [11] “Ispitivanje materijala”, doc. dr. sc. Stoja Rešković, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, www.scribd.com/doc, 2010. (dostupno 2.5.2015)
- [12] <http://sumitwagmare.blogspot.com/2012/10/testing-of-weldments.html> (dostupno 28.4.2015)
- [13] <http://www.aktradersindia.com/material-strength-testing-instrument.html> (dostupno 23.4.2015)
- [14] <http://www.sans.cn/product/list.asp?ClassId=112&CTitle=Drop%20Weight%20Impact%20Tester> (dostupno 15.4.2015)
- [15] <https://www.google.com/search?q=pelini+test&source> (dostupno 8.4.2015)
- [16] <http://www.multitest.bg/en/equipment.html> (12.4.2015)
- [17] <http://www.mpmtechnologies.com/PDF/Plastic%20Impact%20Testing/Instrumented%20Pendulum%20Impact%20Testing%20of%20Plastics.pdf> (dostupno 24.4.2015)

- [18] European standard EN ISO 14556:2000, Steel-Charpy V-notch pendulum impact test-Instrumented test method
- [19] <https://books.google.hr/books?id=fOpHJ2xGyf4C&pg=PA90&lpg=PA90&dq=certified+reference+material+impact&source=bl&ots=PlS0qWg> (dostupno 13.4.2015)
- [20] <http://proficiencytest.eu/english/charpypendulumimpacttest.aspx> (dostupno 17.4.2015)

PRILOZI

- I. Prilog 1 – CD-R disk
- II. Prilog 2 - Dijagrami statičkog vlačnog ispitivanja

PRILOG 2

